

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



تخصص قوى كهربائية

شبكات النقل الكهربائية

٢٦٢ كهر

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي: لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " **شبكات النقل الكهربائية**" لمتدربي تخصص " **قوى كهربائية** " في الكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه: إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

شبكات النقل الكهربائية

خطوط النقل الكهربائي

١

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذه الوحدة تكون:

١. ملما بأنواع خطوط النقل الكهربائي وخصائصها .
٢. ملما بالمواد المستعملة في صناعة الموصلات الكهربائية وكذلك بأنواع أبراج خطوط النقل الكهربائي .
٣. ملما بكيفية حساب الترخيم بين برجين مع الأخذ في الاعتبار العوامل المؤثرة عليه .

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب: ١٢ ساعة

الوسائل المساعدة:

١. استخدم التعليمات في هذه الوحدة .
٢. صور فوتوغرافية ورسوم توضيحية توضح عمليات تركيب خطوط النقل

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات أية لأول مرة.

خطوط النقل الكهربائي

١- ١ أنواع خطوط النقل الكهربائي :

تعتبر خطوط وشبكات النقل الكهربائية بمثابة الشرايين لمنظومات القوى الكهربائية حيث أمكن عن طريقها نقل الطاقة الكهربائية عبر مسافات طويلة من أماكن التوليد إلى مراكز الاستهلاك بتكلفة اقتصادية وتقنيات فنية عالية ، وتصمم معظم خطوط النقل الكهربائي لتعمل بالنظام الثلاثي الأوجه أو الثلاثي الطور على أحد شكلين هما :

- دائرة ثلاثية الأوجه مفردة Three phase single circuit system .
- دائرة ثلاثية الأوجه مزدوجة Three phase double circuit system .

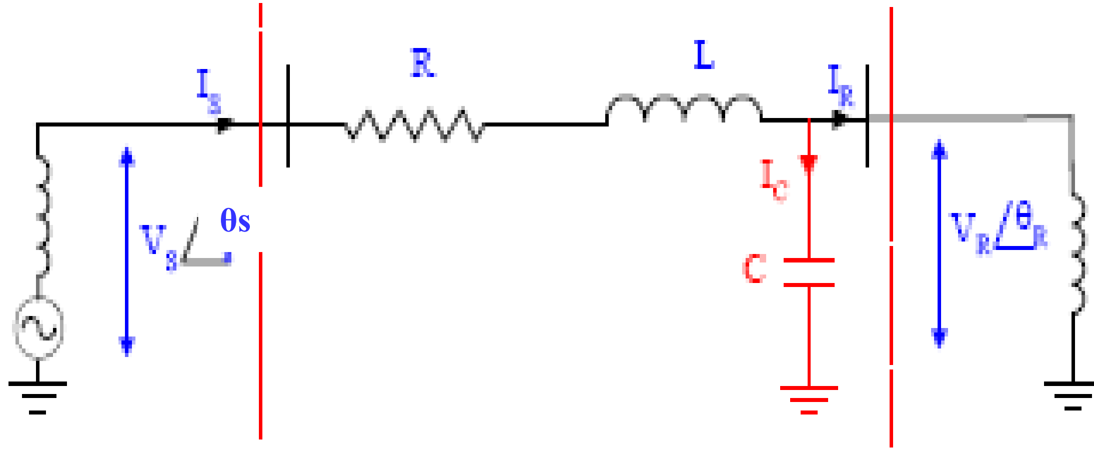
كما أن معظم خطوط النقل الكهربائي عبارة عن خطوط هوائية تستخدم موصلات غير معزولة (مكشوفة) مع الاستفادة من الهواء المحيط بها كوسط عازل . أما في المناطق السكنية أو بالقرب منها حيث لا يمكن استخدام الخطوط الهوائية لأغراض أمنية أو لتحقيق السلامة أو لأسباب أخرى ، فإن القدرة تنقل بواسطة كيابل ت أرضية .

وفي هذه الوحدة ستتم دراسة خطوط النقل الكهربائي الهوائية بأنواعها المختلفة وتصنيفها إلى خطوط قصيرة،وخطوط متوسطة ، وخطوط طويلة على حسب طول الخط ، إضافة إلى دراسة خصائصها الكهربائية وحسابات جهد الإرسال لهذه الخطوط ، كما ستتعرض الدراسة إلى تركيبات خطوط النقل وحسابات الترخيم في حالات التعليق المختلفة لهذه الخطوط .

١- ١- ١ : خواص خطوط النقل الكهربائي :

تتمثل خواص خطوط النقل الكهربائي في المعاملات التي تحدد الأداء الكهربائي للخطوط حيث يمكن التعبير عن هذا الأداء بمعاملات أربع هي المقاومة المادية للخط (R) ، ومواصلة التوازي للخط (G) ، والمفاعلة الحثية للخط (X_L) ، و السعة الكهربائية للخط (C) .

وبناء على ذلك فإن كل موصل من موصلات خط النقل ثلاثي الأوجه يمكن تمثيله بمقاومة R على التوالي مع محاثة L بالتوازي مع سعة C ومواصلة G كما في شكل (١- ١) مع إهمال قيمة مواصلة التوازي G لصغرها لكل متر طولي من طول الخط .



شكل (١- ١) – تمثيل وجه مفرد من خط نقل ثلاثي الأوجه .

أ. **المقاومة المادية للخط (R)** : وتمثل مقاومة موصلات الخط مقدرة بوحدات الأوم **(Ω)** وتعتمد على الشكل الهندسي لموصلات الخط من حيث مساحة المقطع والطول إضافة إلى الخواص الطبيعية لمادة موصلات الخط في شكل المقاومة النوعية للموصل ، وتحسب مقاومة وحدة الأطوال لموصلات الخط من العلاقة التالية :

$$R = \rho / A \qquad (1.1)$$

حيث : R هي مقاومة وحدة الأطوال مقدرة بوحدات Ω/m

ρ هي المقاومة النوعية لمادة الموصل مقدرة بوحدات $\Omega.m$

A هي مساحة مقطع الموصل الفعالة مقدرة بوحدات m^2

وفي حالة الموصلات المصنوعة من الألمنيوم المقوى بالصلب ACSR والمستخدمة بكثرة في خطوط النقل الكهربائي ، يمكن الحصول على المعلومات الدقيقة عن مقاومة وحدة الأطوال لهذه الموصلات من جداول خاصة تعد من قبل المصنعين لهذه الموصلات .

ويتسبب الفقد الناتج عن المقاومة المادية لموصلات الخطوط في رفع درجة حرارة هذه الموصلات والتي تضع حدا حراريا على التحميل للخطوط ، كما تؤثر درجات الحرارة العالية على ارتخاء موصلات الخطوط بين الأبراج ، إضافة إلى نقص قوة الشد للموصلات .

وعند دراسة أداء الخطوط يهمل تأثير المقاومة المادية R ومواصلة التوازي G نظرا لتأثيرهما الضئيل على المعاوقة الكلية المكافئة للخط بالمقارنة مع تأثير المفاعلة الحثية والسعة الكهربائية لموصلات الخط .

ب. مواصلة التوازي للخط (G) : وتمثل هذه المواصلة تيار التسرب بين أوجه (أطوار) الخط والأرض حيث تتأثر قيمة هذا التيار بدرجة عالية بالمناخ ورطوبة الجو والتلوث ونسبة الأملاح ، وعادة ما يهمل هذا التيار وبالتالي قيمة مواصلة التوازي للخطوط في ظروف التشغيل العادية وذلك لصغر القيمة الفعلية له إلى جانب صعوبة تحديد هذه القيمة .

ج. المفاعلة الحثية للخط (X_L) : تعتبر المفاعلة الحثية للخط أكثر الخواص أهمية نظرا لتأثيرها المباشر والفعال على سعة التوصيل والهبوط في الجهد لخطوط النقل ، وبالتالي فإنه في معظم التصميمات والدراسات التحليلية للخطوط تكون المفاعلة الحثية $X_L = \omega.L$ هي العنصر السائد لمعاوقة الخطوط .

وتتأثر قيمة محاثة الخطوط (الحث الذاتي) بالمسافات الفاصلة بين موصلاتها على حسب وضعها على البرج أو العمود الحامل لهذه الموصلات ، ويمكن حساب محاثة الخطوط ثلاثية الأوجه المفردة لكل وجه من العلاقة التالية :

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{D}{r}\right) \qquad (1.2)$$

حيث : L هي محاثة وحدة الأطوال مقدرة بوحدات H/m

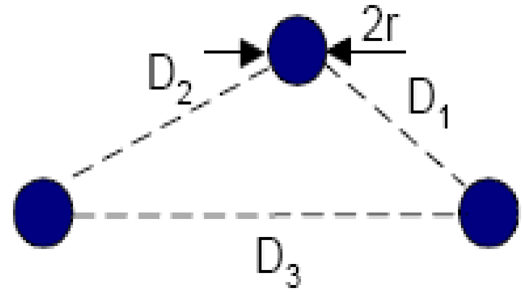
$\mu_o = 4\,\pi \times 10^{-7}$ H/m هي النفاذية المغناطيسية للفراغ .

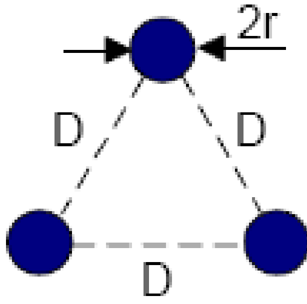
D المسافة بين الموصلات مقدرة بوحدات (m) .

r نصف قطر موصل الخط مقدرة بوحدات (m) .

وعندما تكون المسافة بين موصلات الخط غير متماثلة كما هو موضح بشكل (١- ٢) ، فإنه تؤخذ المسافة المحسوبة بالعلاقة التالية في الاعتبار عند حساب محاثة الخط .

$$D = \sqrt{D_1 . D_2 . D_3} \qquad (1.3)$$





شكل (١- ٢) – المسافة بين موصلات خط نقل ثلاثي الأوجه مفرد .

مثال ١- ١ :

احسب المحاثة لكل وجه لخط نقل ثلاثي الأوجه بدائرة مفردة عندما تكون المسافة بين موصلاته $D = 5$ m ونصف قطر الموصل $r = 1.5$ cm ويعمل تحت تردد $f = 60$ Hz .

الحل :

المحاثة لكل وجه هي :

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{D}{r}\right)$$

$$L = \frac{4\pi * 10^{-7}}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{500}{1.5}\right) = 12.12 * 10^{-7} \quad H/m$$

$$X_L = \omega \, . \, L = 377 * 12.12 * 10^{-7} = 0.457 \quad \Omega/km$$

بالرجوع إلى جدول خواص موصلات الخط المذكور نجد أن المقاومة المادية لوحدة الأطوال تساوي $R = 0.074 \ \Omega/km$ ومن ثم فإن المفاعلة الحثية التي حسبناها تكون ستة أضعاف قيم المقاومة المادية مما يؤكد ما ذكر سابقا عن تناسب قيم كل من R و X_L وإمكانية إهمال قيمة المقاومة المادية لخطوط النقل عند تمثيلها أو إجراء الدراسات التحليلية لها .

د. السعة الكهربائية للخط (C) : عندما يكون فرق الجهد بين الموصلات عاليا جدا يمر تيار إزاحة كهربائية عبر العازل بين الموصلات والأرض والممثل بالهواء في الخطوط الهوائية ، ويكون هذا التيار متقدما عند انعدام الحمل ويعرف بتيار الشحن ، وتتوقف قيمة هذا التيار على سعة الخط وجهد النقل وكذلك التردد .

وتمثل السعة الكهربائية للخط مصدرا للقدرة المفاعلة حيث تتناسب هذه القدرة طرديا مع مربع جهد النقل ، ويظهر تأثير هذه السعة ويصبح جزءا أساسيا في حسابات أداء الخط ومنظومة القوى الكهربائية عندما يزيد طول الخط عن 100 km ويتجاوز الجهد المحمول على الخط 300 kV .

ويمكن حساب السعة الكهربائية للخطوط ثلاثية الأوجه المفردة بين كل وجه وخط التعادل المحايد من العلاقة التالية :

$$C_n = 2\,C = \frac{2\,\pi\,\varepsilon_o}{\ln \dfrac{D}{r}} \qquad (1.4)$$

حيث : C هي السعة الكهربائية لوحدة الأطوال مقدرة بوحدات F/m

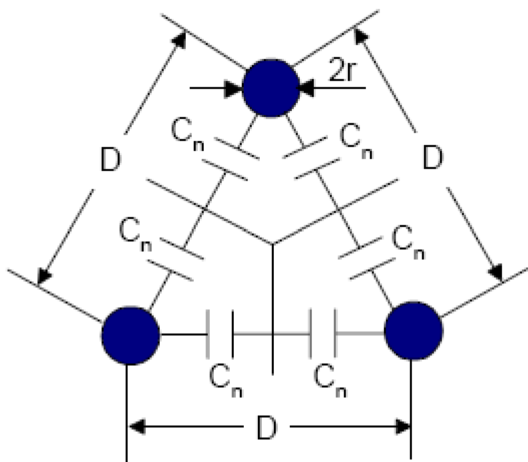
$\varepsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m هي السماحية الكهربائية للفراغ .

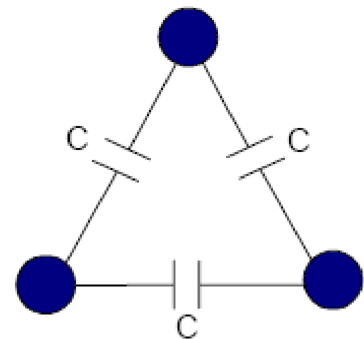
D المسافة بين الموصلات مقدرة بوحدات (m) .

r نصف قطر موصل الخط مقدرة بوحدات (m) .

وعندما تكون المسافة بين موصلات الخط غير متماثلة كما هو موضح بشكل (١- ٣) ، فإنه تؤخذ المسافة المحسوبة بالعلاقة التالية في الاعتبار عند حساب السعة الكهربائية للخط .

$$D = \sqrt{D_1 \,.\, D_2 \,.\, D_3}$$





شكل (١- ٣) – السعة الكهربائية بين موصلات خط نقل ثلاثي الأوجه مفرد .

وعلى ذلك تكون المفاعلة السعوية Capacitive reactance أو مفاعلة التوازي لوحدة الأطوال من طول الخط كما يلي :

$$Xc = 1 / \omega C_n = 1 / 2 \pi f C_n \qquad \Omega/m \qquad (1.5)$$

ويطلق على مقلوب أو معكوس المفاعلة السعوية اسم المسامحة السعوية Capacitive admittance ، وبالتالي تكون المسامحة السعوية لوحدة الأطوال لخط نقل ثلاثي الأوجه مفرد كما يلي :

$$Y = j\,1 / X_c = j \omega C_n = j\,2 \pi f C_n \qquad \text{siemens/m} \qquad (1.6)$$

مثال ١- ٢ :

احسب المسامحة السعوية لكل وجه لخط نقل ثلاثي الأوجه بدائرة مفردة طوله 200 km عندما تكون المسافة بين موصلاته D = 5 m وقطر الموصل 3 cm ويعمل بتردد f = 60 Hz .

الحل

السعة الكهربائية بين كل موصل وخط الحياد لكل وجه هي :

$$C_n = 2C = \frac{2 \pi \varepsilon_o}{\ln \frac{D}{r}} = \frac{2 \pi \times 8.854 \times 10^{-12}}{\ln \frac{500}{1.5}} = 9.577 \times 10^{-12} \qquad F/m$$

السعة الكهربائية بين كل موصل وخط الحياد لكل وجه لكامل الخط هي :

$$C_n = 9.577 \times 10^{-12} \times 200 \times 10^{3} = 1.915 \times 10^{-6} \qquad F.$$

المفاعلة السعوية للخط لكل وجه هي :

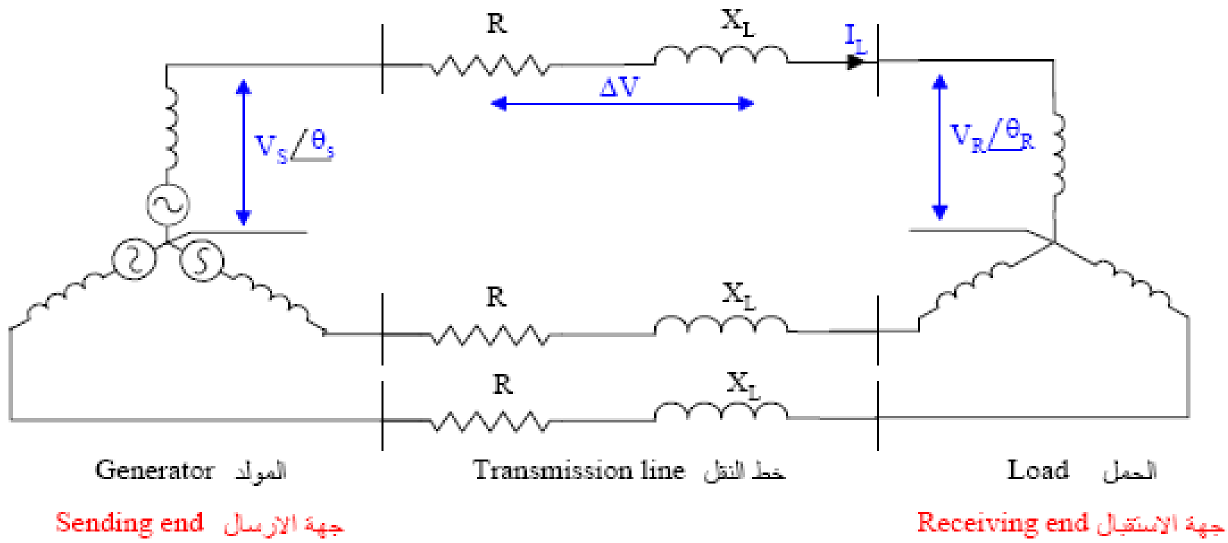
$$Xc = 1 / \omega C_n = 1 / (377 \times 1.915 \times 10^{-6}) = 1385 \quad \Omega$$

وبالتالي تكون المسامحة السعوية للخط لكل وجه هي :

$$Y = j \omega C_n = j\,377 \times 1.915 \times 10^{-6} = 722 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \ \text{siemens}$$

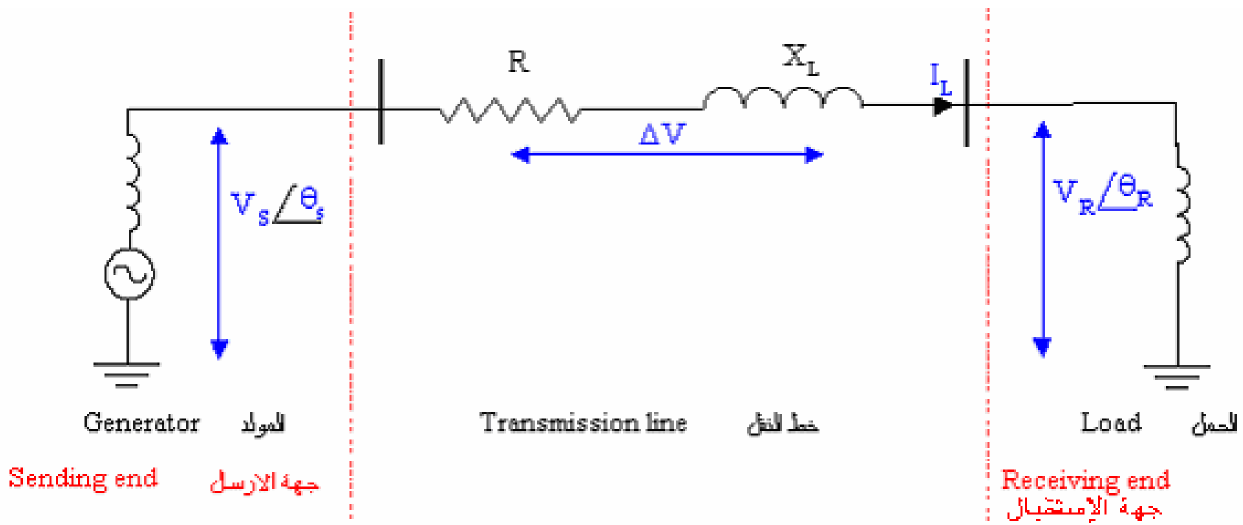
١- ١- ٢ : خطوط النقل القصيرة :

يعتبر الخط قصيرا إذا كان طوله حتى 60 km حيث يمكن إهمال معاملات التوازي للخط (السعة الكهربائية C أو المسامحة السعوية Y) والاكتفاء فقط بالمقاومة المادية R والمفاعلة الحثية X_L للخط ، وعلى ذلك يمكن تمثيل خط النقل القصير بمقاومة ومفاعلة حثية على التوالي لكل وجه كما هو مبين بشكل (١- ٤) حيث يوضح خط نقل قصير يربط بين محطة التوليد والحمل .



شكل (١- ٤) – خط نقل قصير ثلاثي الأوجه يربط بين محطة التوليد والحمل .

ونظرا لتماثل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة السابقة إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما يلي :



شكل (١- ٥) – الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل قصير ثلاثي الأوجه .

حيث إن :

V_s	جهد الوجه عند جهة الإرسال	Sending end voltage per phase
S_s	القدرة الظاهرية عند الإرسال	Apparent power at sending end
P_s	القدرة المفعالة عند الإرسال	Active power at sending end
Q_s	القدرة المفاعلة عند الإرسال	Reactive power at sending end
$\cos\varphi_s$	معامل القدرة عند الإرسال	Power factor at sending end
V_R	جهد الوجه عند جهة الاستقبال	Receiving end voltage per phase
S_R	القدرة الظاهرية عند الاستقبال	Apparent power at receiving end
P_R	القدرة الفعالة عند الاستقبال	Active power at receiving end
Q_R	القدرة المفاعلة عند الاستقبال	Reactive power at receiving end
$\cos\varphi_R$	معامل القدرة عند الاستقبال	Power factor at receiving end
I_L	تيار الخط	Line current
R	مقاومة الخط لكل وجه	Line resistance per phase
X_L	المفاعلة الحثية للخط لكل وجه	Line reactance per phase
ΔV	هبوط الجهد على الخط لكل وجه	Line voltage drop per phase

من الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١- ٥) يمكن كتابة المعادلات الآتية :

جهد الوجه عند جهة الإرسال :

$$V_S = V_R + \Delta V \qquad (1.7)$$

ويمكن حساب الهبوط في الجهد كالتالي :

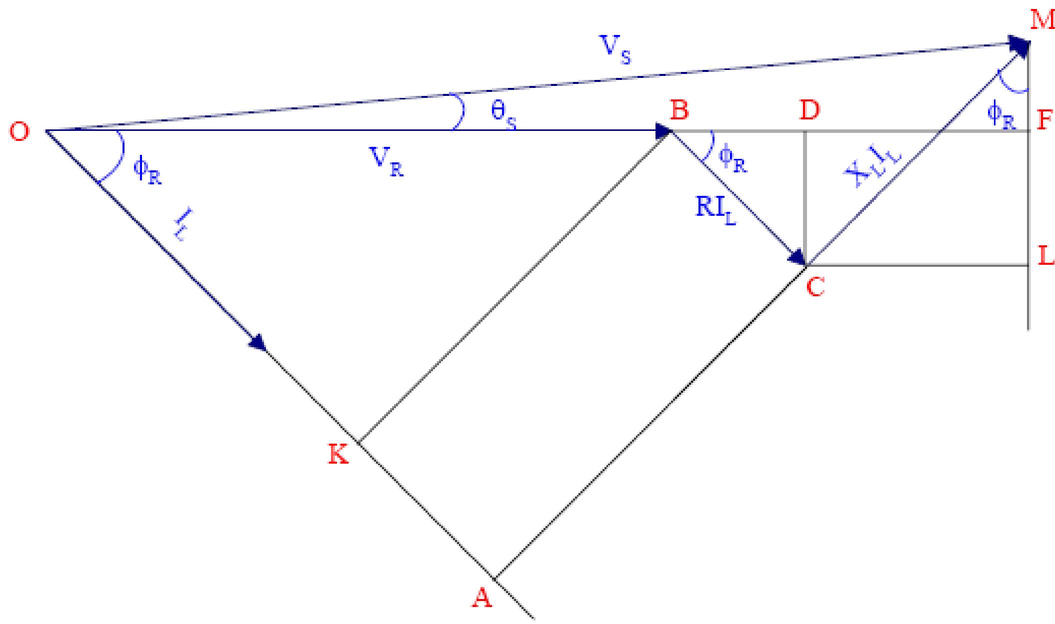
$$\Delta V = Z_L I_L = I_L \cdot R + j I_L \cdot X_L \qquad (1.8)$$

حيث إن : $Z_L = R + j X_L$ هي معاوقة الخط لكل وجه Line impedance

$I_L \cdot R$ هو الهبوط في الجهد عبر المقاومة المادية للخط ويكون في نفس اتجاه تيار الخط Resistive drop in phase with I_L

$I_L . XL$ هو الهبوط في الجهد عبر المفاعلة الحثية للخط ويكون متعامدا على اتجاه تيار الخط Reactive drop in quadrature with I_L

وطبقا للمعادلة (1.7) يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط القصير كما في الشكل (١- ٦).



شكل (١- ٦) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط القصير

من الشكل السابق وباعتبار المثلث قائم الزاوية OMA يمكن استنتاج ما يلي :

$$OM^2 = OA^2 + AM^2 = (OK + KA)^2 + (AC + CM)^2$$

$$OM = \sqrt{(OK + KA)^2 + (AC + CM)^2}$$

$$V_s = \sqrt{(V_R \cos \varphi_R + I_L . R)^2 + (V_R \sin \varphi_R + I_L . X_L)^2} \quad (1.9)$$

- ولحساب القيمة التقريبية للهبوط في الجهد وكذلك جهد الوجه عند الإرسال : بحكم أن الزاوية θs من كل من OM ، OF تكون صغيرة نسبيا ، فإنه يمكن اعتبار المسافة OM = OF تقريبا وهذا يعني أن :

$$OM = OD + DF = OB + BD + DF$$

$$V_S = V_R + BD + DF = V_R + I_L\, R \cos \varphi_R + I_L\, X_L \sin \varphi_R \qquad (1.10)$$

وعلى ذلك تكون القيمة التقريبية للهبوط في الجهد هي :

$$\Delta V = V_S - V_R = I_L\, R \cos \varphi_R + I_L\, X_L \sin \varphi_R \qquad (1.11)$$

- ولحساب القيمة الفعلية للهبوط في الجهد وكذلك جهد الوجه عند الإرسال فإنه تستخدم الأعداد المركبة Complex numbers ، كما يؤخذ جهد الوجه عند الاستقبال V_R كمتجه مرجعي Reference vector ولحساب الزوايا للكميات الأخرى لمخطط المتجهات الموضح في شكل (١- ٦) تحول كل معطيات الخط إلى قيم مركبة كما يلي :

$$V_R = |V_R| + j\,0 = |V_R| \angle 0^\circ \qquad (1.12)$$

$$I_L = |I_L| (\cos \varphi_R - j \sin \varphi_R) = |I_L| \angle -\varphi_R^\circ \qquad (1.13)$$

$$Z_L = R + j\, X_L = |Z_L| \angle \theta^\circ$$

عندما يكون التيار متأخرا Lagging، وحينما يكون الحمل حثينا كما هو الحال في الشكل السابق ، تكون الزاوية سالبة وبالتالي :

$$\Delta V = Z_L \,.\, I_L \angle (\theta - \varphi_R)^\circ \qquad (1.14)$$

ويكون جهد الوجه عند الإرسال :

$$V_S = V_R + \Delta V$$

$$V_S = V_R + Z_L \,.\, I_L \angle (\theta - \varphi_R)^\circ$$

$$V_S = V_R + |I_L| (\cos \varphi_R - j \sin \varphi_R)(R + j\, X_L)$$

$$V_S = V_R + (R\, I_L \cos \varphi_R + X_L\, I_L \sin \varphi_R) + j\,(X_L\, I_L \cos \varphi_R - R\, I_L \sin \varphi_R) \qquad (1.15)$$

$$V_s = \sqrt{(V_R + R\, I_L \cos \varphi_R + X_L I_L \sin \varphi_R)^2 + (X_L\, I_L \cos \varphi_R - R\, I_L \sin \varphi_R)^2}$$

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + Z_L^2\, I_L^2 + 2\, V_R\,(R\, I_L \cos \varphi_R + X_L I_L \sin \varphi_R)} \qquad (1.16)$$

يكون معامل القدرة متقدما Leading حينما يكون الحمل سعوياً، وتصبح زاوية التيار موجبة وبالتالي فإن :

$$I_L = |I_L| (\cos \varphi_R + j \sin \varphi_R) = |I_L| \angle \varphi_R^\circ \qquad (1.17)$$

ويكون جهد الوجه عند الإرسال :

$$V_S = V_R + Z_L .\, I_L \angle (\theta + \varphi_R)^\circ$$

$$V_S = V_R + |I_L| (\cos \varphi_R + j \sin \varphi_R)(R + j\, X_L)$$

$$V_S = V_R + (R\,I_L \cos\varphi_R - X_L\,I_L \sin\varphi_R) + j\,(X_L\,I_L \cos\varphi_R + R\,I_L \sin\varphi_R) \qquad (1.18)$$

$$V_s = \sqrt{(V_R + R\,I_L \cos\varphi_R - X_L\,I_L \sin\varphi_R)^2 + (X_L\,I_L \cos\varphi_R + R\,I_L \sin\varphi_R)^2}$$

وتكون زاوية معامل القدرة عند الإرسال :

$$\varphi_S = \varphi_R + \theta_S \qquad (1.19)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R\,\% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} \times 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 \qquad (1.20)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

- القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3\,V_S\,I_L^* = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_L = P_s + j\,Q_S \qquad (1.21)$$

$$P_S = 3\,V_S\,I_L \cos\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_L \cos\varphi_S \qquad (1.22)$$

$$Q_S = 3\,V_S\,I_L \sin\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_L \sin\varphi_S \qquad (1.23)$$

- القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3\,V_R\,I_L^* = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_L = P_R + j\,Q_R \qquad (1.24)$$

$$P_R = 3\,V_R\,I_L \cos\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_L \cos\varphi_R \qquad (1.25)$$

$$Q_R = 3\,V_R\,I_L \sin\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_L \sin\varphi_R \qquad (1.26)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقيد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3\,R\,I_L^2 = P_S - P_R \qquad (1.27)$$

$$Q_{Loss} = 3\,X_L\,I_L^2 = Q_S - Q_R \qquad (1.28)$$

وللتقليل من القدرة المفقودة يتم رفع الجهد كلما زاد طول الخط وذلك بخفض التيار في حدود الإمكانات الاقتصادية لتكلفة النقل مما يؤدي إلى انخفاض التكلفة الإجمالية نظرا لأنه كلما قل التيار تقل مساحة مقطع الموصل المستخدم وكذلك حجم الأبراج مما ينعكس على التكلفة الإجمالية للخط ، إلا أن هذه المزايا يقابلها في الجهة الأخرى مشاكل تتعلق بضرورة زيادة مستوى العزل الكهربائي للأجهزة والمعدات والعوازل الكهربائية المستخدمة في تعليق موصلات الخط .

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta\ \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \qquad (1.29)$$

مثال ١- ٣ : خط نقل كهربائي قصير ثلاثي الأوجه ، تردده $f = 60\ Hz$ ، له مقاومة $R = 5\ \Omega$ ، ومحاثة $L = 30\ mH$ ، يغذي حملا متوازنا ثلاثي الأوجه مقداره $P = 1000\ kW$ بمعامل قدرة 0.8 تأخر تحت جهد 11 kV بين الخط والخط ، احسب :

أ – الجهد ومعامل القدرة عند جهة الإرسال .

ب- كفاءة الخط .

ج- تنظيم الجهد للخط .

د- ارسم مخطط المتجهات للخط .

الحل

جهد الوجه عند الاستقبال :

$$V_R = \frac{V_{R_L}}{\sqrt{3}} = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350 \quad V.$$

تيار الخط :

$$\mathbf{I_L = \frac{P_R}{3\,V_R \cos\phi_R} = \frac{1000 * 10^3}{3 * 6350 * 0.8} = 65.6 \quad A.}$$

$$\varphi_R = \cos^{-1}(0.8) = 36.87° \qquad lag$$

$I_L = |I_L| \angle \varphi_R^\circ = 65.6 \angle -36.87^\circ \quad A.$

معاوقة الخط :

$Z_L = R + j X_L = 5 + j\, 2\pi * 60 * 0.03 = 5 + j\, 9.4 = 10.65 \angle 62^\circ \quad \Omega.$

الهبوط في الجهد لكل وجه :

$\Delta V = Z_L \,.\, I_L = (65.6 \angle -36.87^\circ)(10.65 \angle 62^\circ) = 698.64 \angle 25.13^\circ \quad V.$

أ – جهد الوجه عند جهة الإرسال :

$V_S = V_R + \Delta V = 6350 + (698.64 \angle 25.13^\circ) = 6988 \angle 2.4^\circ \quad V.$

$V_{SL} = \sqrt{3}\, V_S = \sqrt{3} * 6988 = 12100 \ V. = 12.1 \ kV.$

معامل القدرة عند جهة الإرسال :

$\varphi_S = \varphi_R + \theta_S = 36.87 + 2.4 = 39.3^\circ \quad lag$

$\cos \varphi_S = 0.774 \quad lag$

ب – القدرة الفعالة المفقودة على الخط :

$P_{Loss} = 3\, R\, I_L^2 = 3 * 5 * (65.6)^2 = 64.55 \ kW$

القدرة الفعالة عند جهة الإرسال :

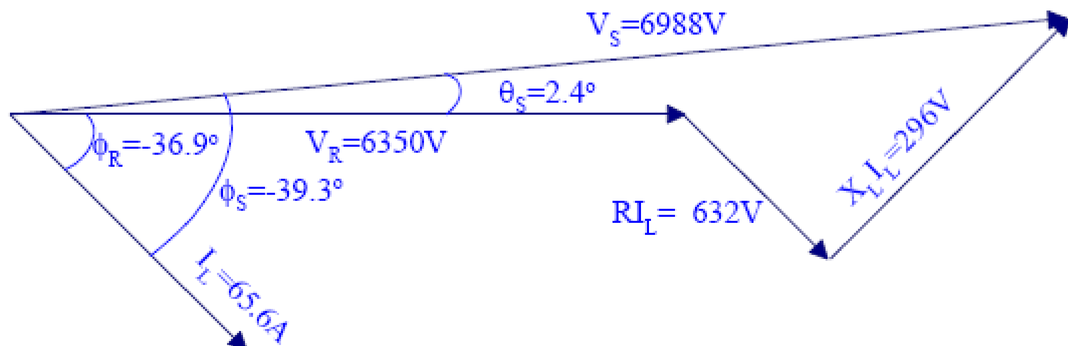
$P_S = P_R + P_{Loss} = 1000 + 64.55 = 1064.55 \quad kW$

كفاءة الخط :

$$\eta\ \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 = \frac{1000}{1064.55} * 100 = 93.94\ \%$$

ج – تنظيم الجهد على الخط :

$$V.R\ \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 = \frac{12.1 - 11}{11} * 100 = 10\ \%$$

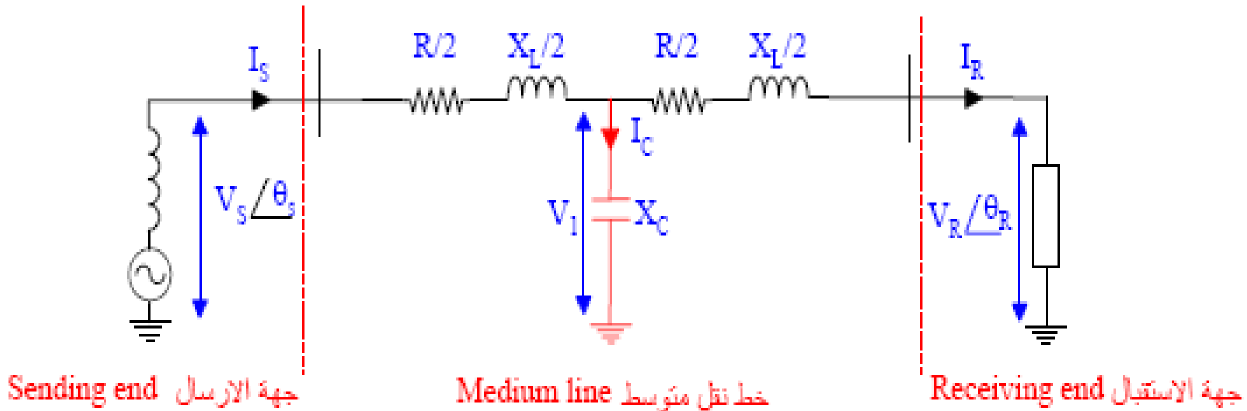


١- ١- ٣ : خطوط النقل المتوسطة :

يعتبر الخط متوسطا إذا كان طوله يتراوح بين $120\ km \rightarrow 60$ حيث لا يمكن إهمال السعة الكهربائية **C** أو المسامحة السعوية **Y** للخط ، بل يتم تركيزها في نقطة المنتصف للخط وتقسيم كل من المقاومة المادية **R** والمفاعلة الحثية X_L للخط إلى نصفين متماثلين على جانبي الخط (**تمثيل T للخط**) أو تركيز معاوقة التوالي (كل من المقاومة **R** والمفاعلة الحثية X_L) للخط في نقطة المنتصف وتقسيم السعة الكهربائية أو المسامحة السعوية للخط إلى نصفين متماثلين عند بداية ونهاية الخط (**تمثيل Π للخط**) ، وعلى ذلك يمكن تمثيل خط النقل المتوسط بإحدى طريقتين كما يلي :

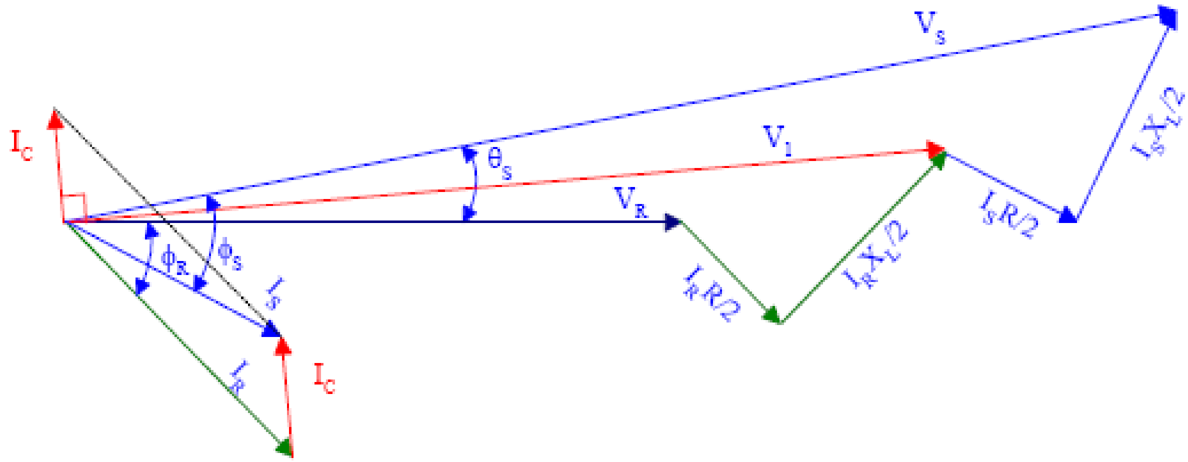
الدائرة المكافئة لخط النقل المتوسط على طريقة T (T- Representation) :

تتمثل هذه الطريقة في اعتبار المفاعلة السعوية مركزة في منتصف الخط بين نصفي المقاومة والمفاعلة الحثية للخط مما يعطي الدائرة المكافئة شكل حرف T ، ونظرا لتماثل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (١- ٧) :



شكل (١- ٧) – الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل متوسط ثلاثي الأوجه ممثل بطريقة T .

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة T كما في الشكل (١- ٨) .



شكل (١- ٨) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة T .

في الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١- ٧) ومخطط المتجهات الموضح في شكل (١- ٨) يتضح أن التيار عند جهة الإرسال يساوي مجموع تياري الاستقبال I_R وتيار الشحن I_C كما يلي :

$$I_S = I_R + I_C \tag{1.30}$$

$$I_C = Y\,V_1 = j\,\omega\,C\,V_1 \tag{1.31}$$

ويمكن حساب الهبوط في الجهد على النصف الأول من الخط كالتالي :

$$\Delta V_R = \frac{Z_L}{2}.I_L = \frac{R + jX_L}{2}.I_L \tag{1.32}$$

وعلى ذلك فإن الجهد عند المكثف يكون :

$$V_1 = V_R + \Delta V_R = V_R + \frac{Z_L}{2} I_R \tag{1.33}$$

أما الهبوط في الجهد على النصف الثاني من الخط فيحسب كالتالي :

$$\Delta V_1 = \frac{Z_L}{2}.I_S = \frac{R + jX_L}{2}.I_S \tag{1.34}$$

بالتعويض من المعادلة (1.33) في المعادلات (1.30) , (1.31) نحصل على :

$$I_S = Y\,V_R + (1 + \frac{Y\,Z_L}{2})\,I_R \tag{1.35}$$

كما أن الجهد عند جهة الإرسال هو مجموع الجهد عبر المكثف والهبوط في الجهد على النصف الثاني للخط كما يلي :

$$V_S = V_R + \Delta V_R + \Delta V_1 = (1+\frac{Y Z_L}{2}) V_R + Z_L (1+\frac{Y Z_L}{4}) I_R \qquad (1.36)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R\,\% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \qquad (1.37)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

- القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3\, V_S\, I_S^* = \sqrt{3}\, V_{S_L}\, I_S = P_s + j\, Q_S \qquad (1.38)$$

$$P_S = 3\, V_S\, I_S \cos\varphi_S = \sqrt{3}\, V_{S_L}\, I_S \cos\varphi_S \qquad (1.39)$$

$$Q_S = 3\, V_S\, I_S \sin\varphi_S = \sqrt{3}\, V_{S_L}\, I_S \sin\varphi_S \qquad (1.40)$$

- القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3\, V_R\, I_R^* = \sqrt{3}\, V_{R_L}\, I_R = P_R + j\, Q_R \qquad (1.41)$$

$$P_R = 3\, V_R\, I_R \cos\varphi_R = \sqrt{3}\, V_{R_L}\, I_R \cos\varphi_R \qquad (1.42)$$

$$Q_R = 3\, V_R\, I_R \sin\varphi_R = \sqrt{3}\, V_{R_L}\, I_R \sin\varphi_R \qquad (1.43)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقيد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3\,(R/2)\,(I_S^2 + I_R^2) = P_S - P_R \qquad (1.44)$$

$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \qquad (1.45)$$

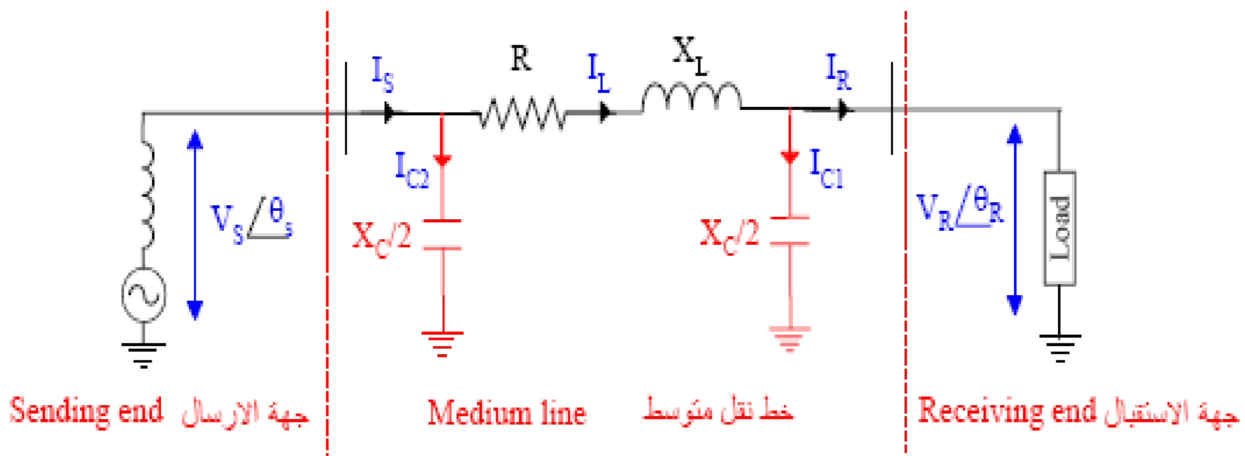
وللتقليل من القدرة المفقودة يتم رفع الجهد كلما زاد طول الخط وذلك بخفض التيار في حدود الإمكانات الاقتصادية لتكلفة النقل .

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta\ \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \qquad (1.46)$$

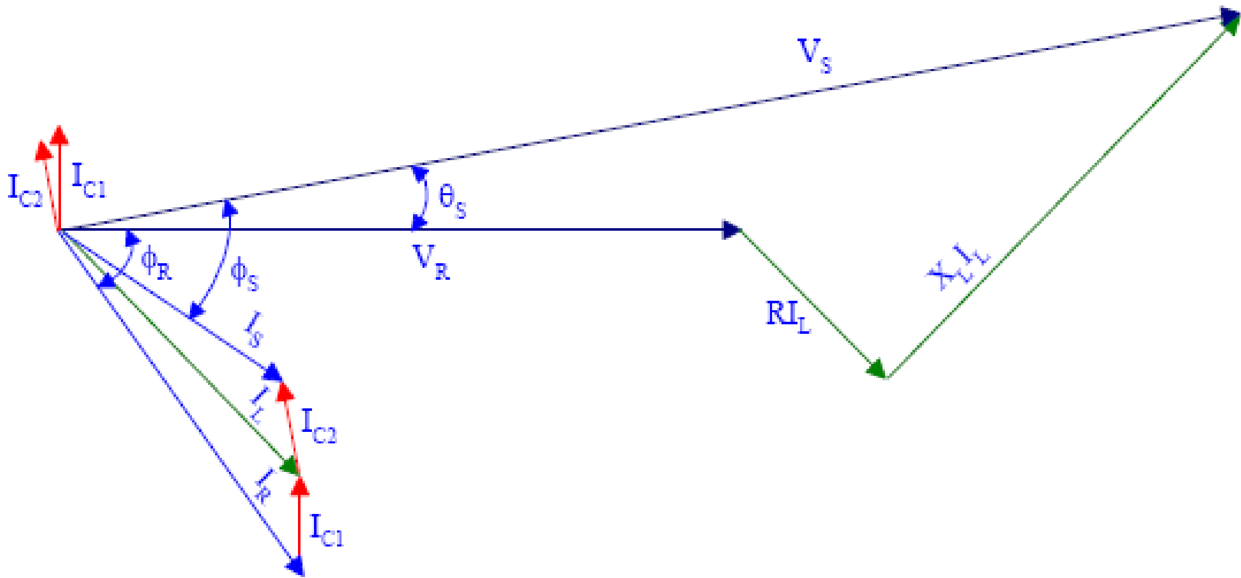
الدائرة المكافئة لخط النقل المتوسط على طريقة (Π - Representation (Π :

تتمثل هذه الطريقة لتمثيل خطوط النقل المتوسطة في تقسيم المفاعلة السعوية إلى نصفين ، حيث يوضع النصف الأول في بداية الخط عند جهة الإرسال والنصف الثاني عند جهة الاستقبال بينما تتركز المقاومة والمفاعلة الحثية في الوسط مما يعطي الدائرة المكافئة شكل حرف Π ، ونظرا لتماثل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (١- ٩) :



شكل (١- ٩) – الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل متوسط ثلاثي الأوجه ممثل بطريقة Π .

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة π كما في الشكل (١- ١٠) .



شكل (١- ١٠) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة Π .

في الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١- ٩) ومخطط المتجهات الموضح في شكل (١- ١٠) يتضح أن تيار الخط يساوي مجموع تياري الاستقبال I_R وتيار الشحن عند طرف الاستقبال I_{C1} كما يلي :

$$I_L = I_R + I_{C1} \qquad (1.47)$$

حيث إن تيار الشحن عند طرف الاستقبال يحسب من العلاقة التالية :

$$I_{C1} = (Y/2)\, V_R = j\,(\omega\, C/2)\, V_R \qquad (1.48)$$

أما تيار الشحن عند طرف الإرسال فيحسب من العلاقة :

$$I_{C2} = (Y/2)\, V_S = j\,(\omega\, C/2)\, V_S \qquad (1.49)$$

وحيث إن الهبوط في الجهد على الخط يعطى بالعلاقة :

$$\Delta V = Z_L \,.\, I_L = (R + j\, X_L) \,.\, I_L \qquad (1.50)$$

وعلى ذلك فإن الجهد عند جهة الإرسال يحسب كالتالي :

$$V_S = V_R + \Delta V = V_R + Z_L \,.\, I_L = V_R + Z_L\,(\, I_R + I_{C1}) \qquad (1.51)$$

بالتعويض من المعادلة (1.48) في المعادلة (1.51) نحصل على :

$$V_S = V_R + \Delta V_R + \Delta V_1 = (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,V_R + Z_L\,I_R \quad (1.52)$$

أما التيار عند جهة الإرسال فيحسب كالتالي :

$$I_S = I_L + I_{C2} = I_R + I_{C1} + I_{C2} = I_R + (Y/2)\,V_R + (Y/2)\,V_S \quad (1.53)$$

بالتعويض من المعادلة (1.52) في المعادلة (1.53) نحصل على :

$$I_S = Y\,(1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,V_R + (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,I_R \quad (1.54)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R\,\% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \quad (1.55)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

- القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3\,V_S\,I_S^* = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S = P_s + j\,Q_S \quad (1.56)$$

$$P_S = 3\,V_S\,I_S \cos\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S \cos\varphi_S \quad (1.57)$$

$$Q_S = 3\,V_S\,I_S \sin\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S \sin\varphi_S \quad (1.58)$$

- القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3\,V_R\,I_R^* = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R = P_R + j\,Q_R \quad (1.59)$$

$$P_R = 3\,V_R\,I_R \cos\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R \cos\varphi_R \quad (1.60)$$

$$Q_R = 3\,V_R\,I_R \sin\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R \sin\varphi_R \quad (1.61)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقيد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3 R I_L^2 = P_S - P_R \quad (1.62)$$

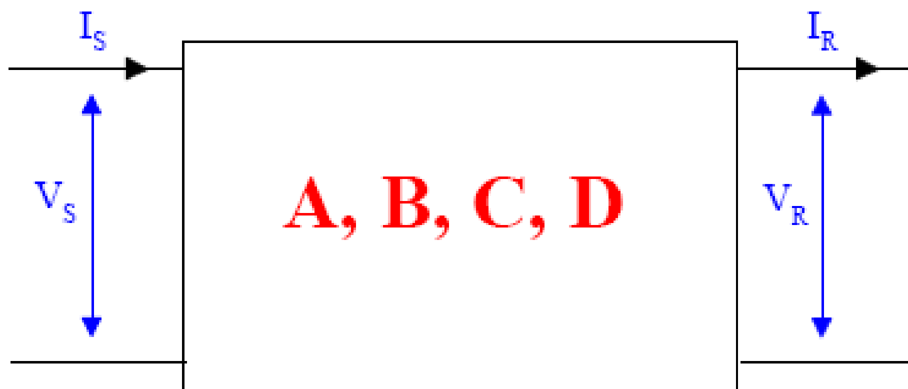
$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \quad (1.63)$$

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta \ \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \quad (1.64)$$

ثوابت الدائرة المكافئة للخط المتوسط :

يمكن اختصار الدائرة الكهربائية المكافئة للخط المتوسط إلى دائرة مكافئة رباعية الأطراف ذات دخلين (الجهد والتيار عند جهة الإرسال) وخرجين (الجهد والتيار عند جهة الاستقبال) ، حيث ترتبط متغيرات الدخل والخرج بعلاقات تحوي ثوابت تسمى الثوابت العامة للخط كما هو موضح في شكل (١- ١١) :



شكل (١- ١١) – الثوابت العامة لخط النقل

$$V_S = A\,V_R + B\,I_R \tag{1.65}$$

$$I_S = C\,V_R + D\,I_R \tag{1.66}$$

وتتغير هذه الثوابت حسب طريقة التمثيل المستخدمة في دراسة خط النقل المتوسط ، ويمكن الرجوع إلى معادلات الجهد والتيار لكل من الدائرتين المكافئتين الممثلتين لخطوط النقل المتوسطة ، وبالتالي حساب الثوابت العامة لهذا الخط كما يلي :

- **الثوابت العامة لخط نقل متوسط ممثل على طريقة T :**

بالرجوع إلى معادلة الجهد عند جهة الإرسال (1.36) ومعادلة التيار عند جهة الإرسال (1.35) وترتيب المعاملات على شكل المعادلتين (1.66) , (1.65) يمكن تحديد الثوابت العامة للخط كما يلي :

$$V_S = (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,V_R + Z_L\,(1+\frac{Y\,Z_L}{4})\,I_R$$

$$I_S = Y\,V_R + (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,I_R$$

$$A = D = (1+\frac{Y\,Z_L}{2}) \tag{1.67}$$

$$B = Z_L\,(1+\frac{Y\,Z_L}{4}) \tag{1.68}$$

$$C = Y \tag{1.69}$$

- **الثوابت العامة لخط نقل متوسط ممثل على طريقة Π :**

بالرجوع إلى معادلة الجهد عند جهة الإرسال (1.52) ومعادلة التيار عند جهة الإرسال (1.54) وترتيب المعاملات على شكل المعادلتين (1.66) , (1.65) يمكن تحديد الثوابت العامة للخط كما يلي :

$$V_S = (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,V_R + Z_L\,I_R$$

$$I_S = Y\,(1+\frac{Y\,Z_L}{4})\,V_R + (1+\frac{Y\,Z_L}{2})\,I_R$$

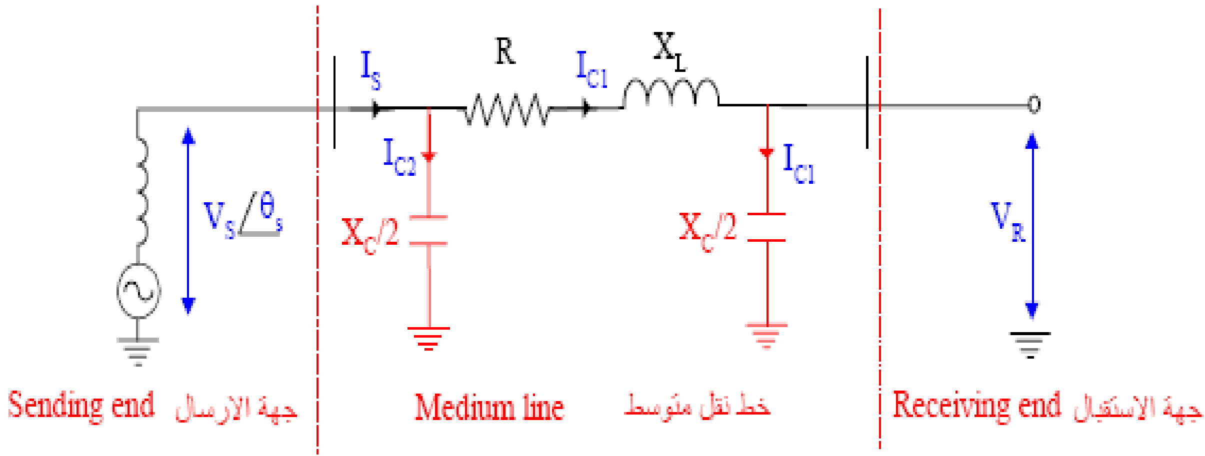
$$A = D = (1+\frac{Y\,Z_L}{2}) \tag{1.70}$$

$$B = Z_L \tag{1.71}$$

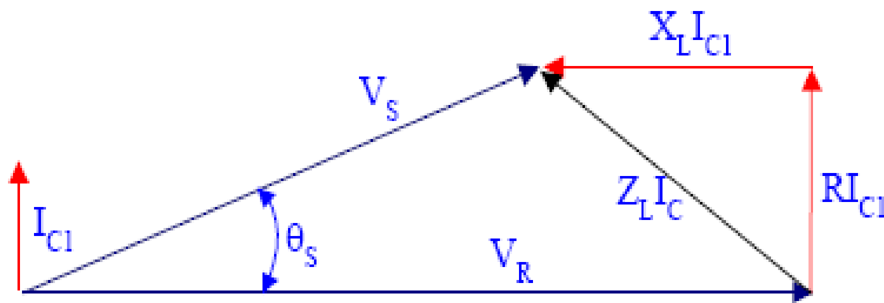
$$C = Y \left(1 + \frac{Y Z_L}{4}\right) \tag{1.72}$$

- تيار الشحن وجهد الإرسال لخط نقل متوسط عند اللاحمل :

نظرا لوجود السعة الكهربائية في تمثيل الخطوط المتوسطة فإن المفاعلة السعوية للخط X_C تحدث تيار شحن متقدما عند جهة الإرسال وخاصة عندما تكون الدائرة غير محملة ، وفي هذه الحالة يكون الجهد عند الاستقبال أكبر من الجهد عند الإرسال حيث تعرف هذه الظاهرة باسم ظاهرة فرانتي Ferranti Effect كما هو موضح بالدائرة المكافئة ومخطط المتجهات للخط تحت هذه الظروف في الأشكال (١- ١٢) ، (١- ١٣) :



شكل (١- ١٢) – خط نقل متوسط غير محمل ممثل بطريقة **Π** .



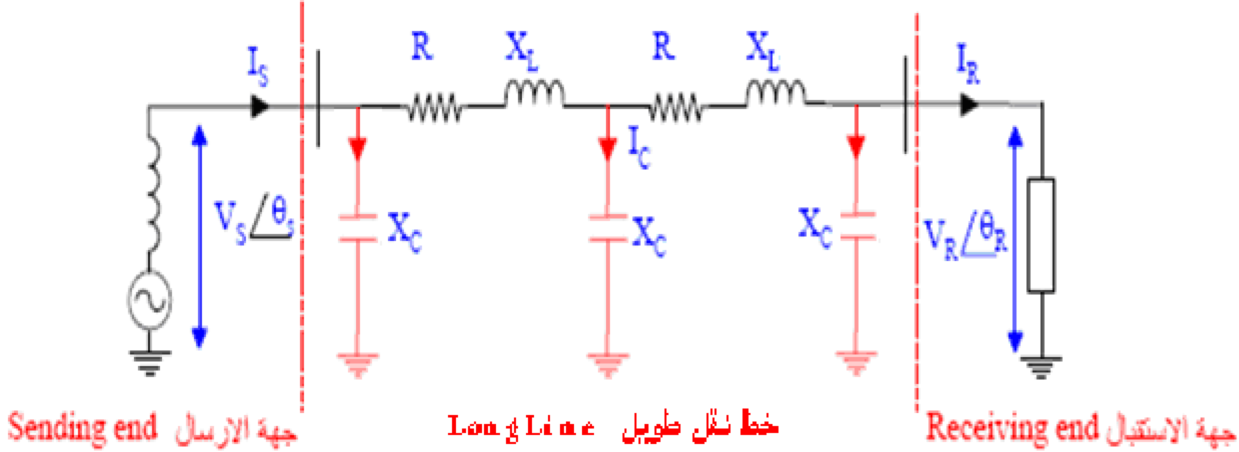
شكل (١- ١٣) – مخطط المتجهات لخط نقل متوسط غير محمل ممثل بطريقة **Π** .

ويحسب جهد الإرسال للخط عند اللاحمل من العلاقة التالية :

$$V_S = \sqrt{(V_R - X_L I_{C1})^2 + (R I_{C1})^2} \tag{1.73}$$

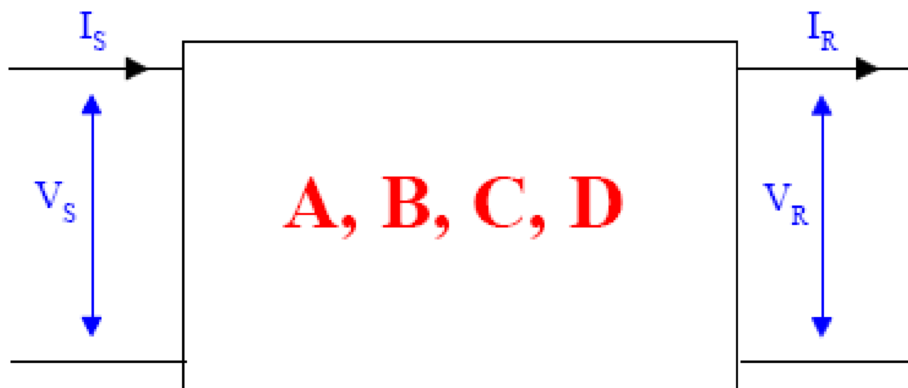
١- ١- ٤ : خطوط النقل الطويلة :

يعتبر الخط طويلا إذا كان طوله أكبر من 120 km حيث لا يمكن إهمال السعة الكهربائية C أو المسامحة السعوية Y للخط ، وأيضا لا يمكن تركيزها في نقطة ما على الخط ، بل يتم توزيعها بانتظام على طول الخط وكذا الحال بالنسبة للمقاومة المادية R والمفاعلة الحثية X_L للخط ، ونظرا لتماثل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وكتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (١- ١٤) :



شكل (١- ١٤) – الدائرة المكافئة المفردة لخط نقل طويل ثلاثي الأوجه .

ونظرا للتوزيع المنتظم للمقاومة والمفاعلات الحثية والسعوية على طول الخط فإنه يمكن تمثيل خط النقل الطويل باستخدام الدائرة المكافئة رباعية الأطراف واستخدام الثوابت العامة للخط كما هو موضح في شكل (١- ١٥) :



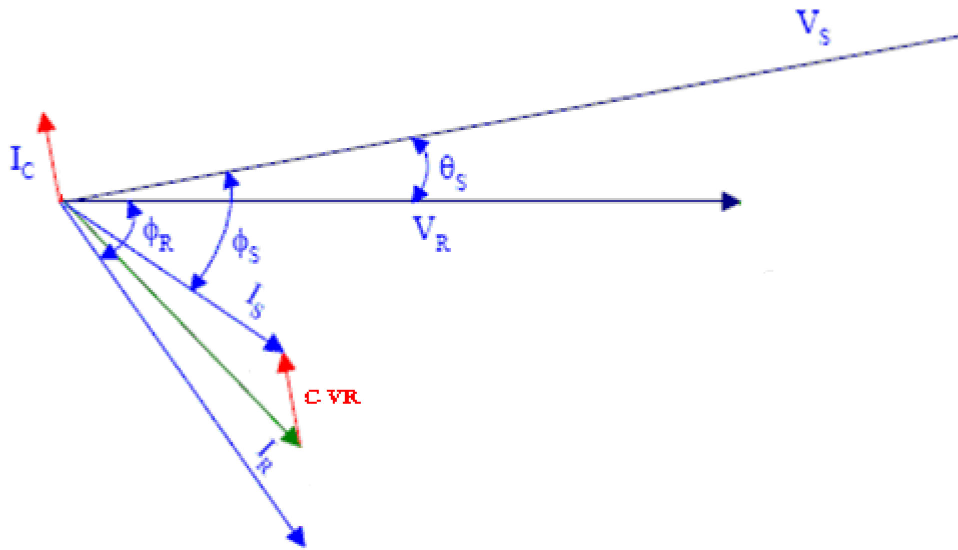
شكل (١- ١٥) – الدائرة المكافئة والثوابت العامة لخط النقل الطويل

وعلى ذلك يمكن كتابة معادلات الجهد والتيار عند جهة الإرسال بدلالة الجهد والتيار عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V_S = A\,V_R + B\,I_R \tag{1.74}$$

$$I_S = C\,V_R + D\,I_R \tag{1.75}$$

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط الطويل كما في الشكل (١- ١٦) .



شكل (١- ١٦) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط الطويل .

وتحسب هذه الثوابت باستخدام معاوقة الخواص ومسامحة التوازي للخط ، وبالتالي تكون الثوابت العامة لهذا الخط كما يلي :

$$A = D = 1+\frac{Y\,Z_L}{2}+\frac{Y^2\,Z_L^2}{6} \tag{1.76}$$

$$B = Z_L\,.\,(1+\frac{Y\,Z_L}{4}+\frac{Y^2\,Z_L^2}{24}) \tag{1.77}$$

$$C = Y\,.\,(1+\frac{Y\,Z_L}{4}+\frac{Y^2\,Z_L^2}{24}) \tag{1.78}$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R\,\% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \qquad (1.79)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

- القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3\,V_S\,I_S^* = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S = P_s + j\,Q_S \qquad (1.80)$$

$$P_S = 3\,V_S\,I_S \cos\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S \cos\varphi_S \qquad (1.81)$$

$$Q_S = 3\,V_S\,I_S \sin\varphi_S = \sqrt{3}\,V_{S_L}\,I_S \sin\varphi_S \qquad (1.82)$$

- القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3\,V_R\,I_R^* = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R = P_R + j\,Q_R \qquad (1.83)$$

$$P_R = 3\,V_R\,I_R \cos\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R \cos\varphi_R \qquad (1.84)$$

$$Q_R = 3\,V_R\,I_R \sin\varphi_R = \sqrt{3}\,V_{R_L}\,I_R \sin\varphi_R \qquad (1.85)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة الغير فعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقيد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3\,R\,I_L^2 = P_S - P_R \qquad (1.86)$$

$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \qquad (1.87)$$

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta\,\% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \qquad (1.88)$$

١- ٢ : تركيبات خطوط النقل الكهربائي :

الوظيفة الأساسية لخطوط النقل الكهربائي هي نقل القدرة الكهربائية من مكان إلى آخر، والمكون الرئيس لخط النقل هو الموصل حيث إن الموصل هو الناقل الفعلي للطاقة الكهربائية أما باقي تركيبات خطوط النقل فهي إما لحمل وتثبيت الموصل أو لعزل الموصلات عن الأرض وعن بعضها ، وخطوط النقل الكهربائي غالبا ما تكون في صورة خطوط نقل هوائية فوق الرأس، ويطلق عليها الخطوط الهوائية لكون الهواء هو العازل الرئيسي بين الموصلات وبعضها حيث تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة محمولة على أبراج لرفع هذه الموصلات عن سطح الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان، وكذلك للحفاظ على المسافة بين الموصلات ثابتة ، وتكون الموصلات معزولة عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين أما على طول مسار الخط يكون الهواء هو العازل بين الموصلات والأرض وبين الموصلات وبعضها.

وخطوط النقل يجب أن تتوافر لها الخصائص الآتية :

- يجب أن يكون الجهد ثابتا على طول الخط
- يجب أن يكون الفقد في القدرة أقل ما يمكن حتى تكون كفاءة النقل عالية وتكلفة النقل أقل ما يمكن
- يجب أن لا يتسبب الفقد في القدرة في تسخين الموصل لدرجة تسبب تغييرا في الخواص الكهربية والميكانيكية للموصل
- يجب أن يتحمل الموصل الإجهاد الميكانيكي الواقع عليه نتيجة وزنه وكذلك نتيجة لتراكم الثلوج أوتأثير ضغط الرياح عليه

وسوف نتعرف في هذه الوحدة على أهم الاعتبارات الخاصة بتركيبات خطوط النقل الهوائية وعلى أهم المواد المستعملة في صناعة موصلات خطوط النقل وكذلك على الأشكال المختلفة لأبراج خطوط النقل الكهربائي.

وحيث إن الترخيم في الموصلات من أهم الاعتبارات التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند تصميم وإنشاء خط النقل لما له من علاقة مباشرة بالإجهاد الميكانيكي المؤثر على الموصل ولأن مقدار الترخيم يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض والذي يجب أن لا يقل عن حد معين يتم تحديده تبعا لمستوى جهد الخط طبقا لاشتراطات الأمن والسلامة المعمول بها في هذا المجال فإننا سوف ندرس كيفية حساب الترخيم عندما يكون الخط معلقا بين برجين متماثلين على أرض مستوية، وكذلك عندما تكون نقاط تثبيت الموصل ليست على نفس المستوى وذلك عندما يكون الموصل معلقا بين برجين مختلفين أو عندما

يكون مسار الخط مارا بمنطقة جبلية أو هضابية. وسندرس أيضا كيفية حساب تأثير تراكم الثلوج وضغط الرياح على مقدار الترخيم والشد في الموصل.

١- ٢- ١ : المواد المستعملة في صناعة الموصلات وخصائصها :

الموصل هو الجزء الرئيس في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربية من مكان إلى آخر والموصلات المستخدمة في خطوط النقل غالبا ما تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان إلى أكثر من 250 مترا وهذه المسافة تعرف بباع البرج أو بحر السلك "span".

وكون الموصل معلقا يجعله دائما واقعا تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسيا إلى أسفل مسببا إجهاد شد في الموصل، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد الواقع عليها، وأن تكون خفيفة الوزن حتى تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط، وعموما فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

- المسافة بين البرجين و مقدار الترخيم المسموح به
- الشد في الموصلات
- ما إذا كان الجو المحيط يحتوي على مواد أكالة أي تسبب تآكل الموصلات أم لا
- هل سيكون الخط معرضا للاهتزازات أم لا ؟
- الفقد في القدرة على الخط
- الهبوط في الجهد على الخط
- الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط
- مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل ويتم تحديد حجم الموصل بناءً على مجموعة من الاعتبارات كالهبوط في الجهد والسعة الحرارية للموصل واعتبارات اقتصادية خاصة بتكلفة الموصل.

والمواد التي يمكن استخدامها في صناعة الموصلات كثيرة كالنحاس والألنيوم وغيرها، وللحكم على مناسبة أي منها لصناعة موصلات خطوط النقل يلزم المفاضلة بين الخصائص الميكانيكية (كالمتانة الميكانيكية ومعامل المرونة ومعامل التمدد الحراري) والخصائص الكهربية (كالموصلية) لكل من هذه المواد واختيار المادة التي لها أفضل مجموعة من الخواص بأقل تكلفة، وفيما يلي سنتعرف على خصائص المواد المستعملة في صناعة الموصلات:

أ - الموصلية Conductivity :

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الفقد في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية. حيث إن الفقد في القدرة (P_L) في خط ثلاثي الأوجه يمكن حسابه كالآتي:

$$P_L = 3I^2R \tag{1.89}$$

$$R = \frac{L}{\sigma . a} \tag{1.90}$$

حيث : R هي مقاومة موصل الوجه الواحد مقدرة بالأوم (Ω)

L طول الموصل مقدرا بالمتر (m)

(a) مساحة مقطع الموصل مقدرة بالمتر المربع (m^2)

(σ) الموصلية للمادة المصنوع منها الموصل مقدرة بالأوم .متر (Ω.m)

وواضح من المعادلة (1.90) أنه كلما زادت الموصلية قلت مقاومة الموصل وقل بالتبعية الفقد في القدرة في الخط، وإذا زادت الموصلية يمكن أيضا استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل مما يؤدي إلى توفير في مادة الموصل وتوفير في تكلفة الموصل المستخدم.

ب - المتانة الميكانيكية Mechanical Strength :

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة، وعادة ما تستخدم نسبة المتانة إلى الوزن للمفاضلة بين المواد المختلفة حيث إنه كلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

ج - معامل المرونة Modulus of Elasticity

يعرف معامل المرونة (معامل يونج Young's Coefficient) لأي مادة بأنه نسبة الإجهاد الواقع على المادة إلى الانفعال الحادث لها. (الانفعال هو مقدار التغير الحادث في أبعاد المادة منسوبا إلى أبعادها الأصلية)، وكلما كان معامل المرونة لمادة الموصل أكبر كلما كان الموصل قادرا على الحفاظ على أبعاده دون تغيير، لأن استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه.

د - معامل التمدد الحراري Heat expansion coefficient :

حيث إن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناجية نظرا لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تربو على 40 درجة مئوية وقد تصل إلى 50 درجة وأكثر في بعض المناطق، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيرا فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف في حين أنها ستنكمش انكماشا شديدا في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع، ولهذا السبب فإنه يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير.

هـ - التكلفة Cost :

والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل وذلك للمحافظة على تكلفة نقل الطاقة الكهربية أقل ما يمكن، والمادة التي يصنع منها الموصل يتم اختيارها بحيث يكون لها أفضل مجموعة من الخصائص بأقل تكلفة.

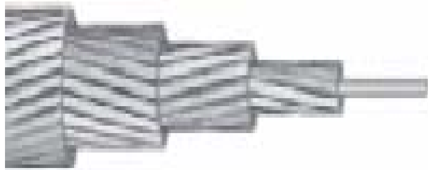
وبالنظر إلى المواد الموصلة نجد أن الفضة لها أعلى موصلية كهربائية ولكن تكلفتها العالية تحول دون استخدامها كموصل كهربائي إلا في بعض التطبيقات الدقيقة المحدودة جدا. وبعد الفضة من حيث جودة التوصيل الكهربائي يأتي النحاس، والنحاس كمادة موصلة يتمتع بموصلية عالية لا يفوقه فيها إلا الفضة وتكلفته أقل بكثير من الفضة ، ويمكن بالمعالجات الحرارية أن نحصل على خواص مختلفة فمثلا النحاس المسحوب على البارد هو أفضل أنواع النحاس توصيلا للكهرباء ولكن تنقصه المرونة ، في حين أن النحاس الأحمر المخمر أقل قليلا في الموصلية والمتانة الميكانيكية ولكنه يتمتع بمرونة عالية ولذلك يستخدم في تصنيع أسلاك التمديدات الداخلية للمباني والمصانع ، في حين يستخدم النحاس المسحوب على البارد في تصنيع القضبان العمومية والموصلات التي تحتاج إلى متانة ميكانيكية عالية، وأدت كثرة الطلب على النحاس (لما له من خواص مميزة في التوصيل في التوصيل الكهربائي والمتانة الميكانيكية) إلى ارتفاع سعره لدرجة تجعله غير مناسب اقتصاديا لتصنيع موصلات خطوط النقل الهوائي إلا في أضيق الحدود وحين تكون هناك ضرورة تقنية ملحة كأن تكون المتانة الميكانيكية للموصلات مطلباً أساسياً كما في الموصلات الهوائية الخاصة بوسائل النقل الكهربائي كالترام ومترو الأنفاق .

والمادة الأكثر استعمالا في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألمنيوم حيث إن الألمنيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن الألمنيوم له موصلية عالية تزيد على 60%

من موصلية النحاس، ويتمتع الألمنيوم إلى جانب الموصلية العالية نسبيا بخفة الوزن ورخص الثمن ، وإذا كانت المتانة الميكانيكية للألمنيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة سنستعرضها فيما يلي ونحن نستعرض أهم أنواع موصلات خطوط النقل المستخدمة فعلا في الحياة العملية.

١- ٢- ٢ : أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي :

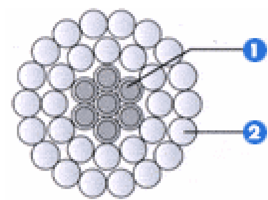
معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة مكونة من قلب مكون من سلك واحد مستقيم محاطاً بطبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب ويكون اتجاه جَدْل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجَدْل في الطبقة السابقة كما هو موضح بشكل (١- ١٧) ، وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس والكادميوم يوجد عدة أنواع من الموصلات المبنية على الألمنيوم والتي تعطي أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة.


شكل (١- ١٧) اتجاه جدل السلك

أ –الألمنيوم All Aluminum Conductor AAC

أرخص أنواع الموصلات حيث إنه أرخص من أي موصل آخر يمكن أن يستخدم لنفس التيار ولكن المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسبا فقط عندما تكون خطوة البرج قصيرة.

ب - الألمنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR



١. قلب من أسلاك الصلب
٢. أسلاك الألومنيوم
شكل (١- ١٨) أسلاك الألومنيوم المقوى بالصلب

يتكون هذا الموصل من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أو أكثر من أسلاك الألمنيوم، كما هو موضح بالشكل (١- ١٨) ، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألمنيوم وأسلاك الصلب وأكثر موصلات هذا النوع شيوعا هي الموصلات 26/7 أي التي تتكون من 26 سلك ألمنيوم و 7 أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألمنيوم . وهذا النوع من الموصلات له متانة أعلى من موصلات الألمنيوم

ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج أكبر ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من الألمنيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية

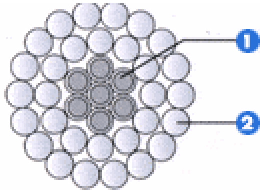
أعلى بكثير من الألمنيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألمنيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

ج - موصلات سبائك الألمنيوم All Aluminum Alloy Conductor AAAC

وهذا النوع عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حراريا من الألمنيوم والماغنسيوم والسيليكون ، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن ACSR , AAC حيث إن له متانة عالية جداً (له أكبر نسبة متانة/الوزن) وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج والتقليل من تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلا وتحسين أداء الخط . وهذا الموصل له مقاومة كهربائية أقل وبالتالي يسبب فقداً أقل في القدرة على الخط ، و هو أيضا غير معرض لمشكلة تآكل الجلفنة كما في موصلات ACSR وتركيباته أقل تعقيدا وأسطحه أقل عرضة للتلف ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة.

د - الألمنيوم المقوى بسبيكة الألمنيوم Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR

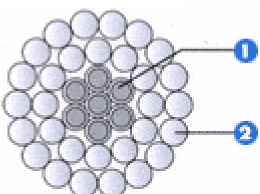
وهو مشابه تماما ل ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألمنيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألمنيوم وموصلات الألمنيوم المقوى بالصلب.



1- قلب من سبيكة من الألومنيوم
2- أسلاك من الألومنيوم

هـ - سبيكة الألمنيوم المقواه بالصلب Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced AACSR

وهو مشابه ل ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألمنيوم بأسلاك من سبيكة الألمنيوم، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصا في أسلاك الأرضي.



1- قلب من أسلاك الصلب
2- أسلاك من سبيكة من الألومنيوم

١- ٢- ٣ : أبراج خطوط النقل الكهربائي : Power Poles and Towers

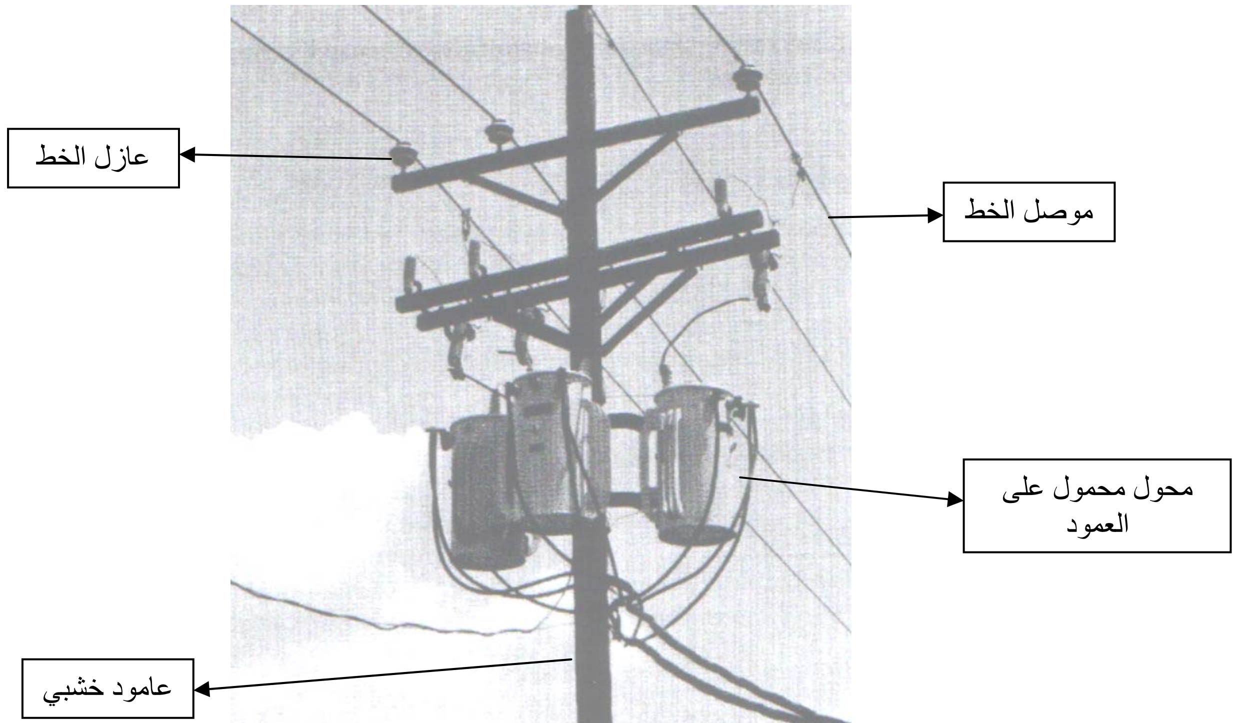
وظيفة أبراج خطوط النقل هي تثبيت الموصلات ويجب أن تكون هذه الأبراج محصورة داخل حقوق المرور المتاحة ومطابقة للاعتبارات الجمالية للمنطقة التي يتم تركيبها بها فالأبراج التي تستخدم لحمل

خطوط النقل في الصحراء لا تصلح بحال لحمل أسلاك الكهرباء داخل المدن، وهناك العديد من الوسائل المستخدمة لحمل وتثبيت خطوط النقل و هي:

١. الأعمدة الخشبية : Wooden Poles

تعتبر الأعمدة الخشبية أرخص أنواع الأعمدة وتصنع من أخشاب شجر الأَرز والصنوبر وذلك لطولها واستقامتها وتتوافر الأعمدة الخشبية في أطوال تبدأ من 25 قدم حتى 130 قدم أو أكثر حسب الطلب وبزيادة مقدارها ٥ أقدام. وتتميز الأعمدة الخشبية بمرونتها حيث تنحني إذا تعرضت لأحمال ميكانيكية عالية ثم تعود إلى وضعها الطبيعي بزوال الحمل وهذه الخاصية تجعلها ملائمة تماما لأغراض تثبيت الموصلات ولذا ينصح باستعمالها كلما أمكن ذلك، لأنه في حالة تعرض الموصلات لقوى شديدة كتلك الناتجة عن عاصفة مثلاً فإن حركة العمود الخشبي تمتص هذه القوة وتخفف من تأثيرها على الموصلات.

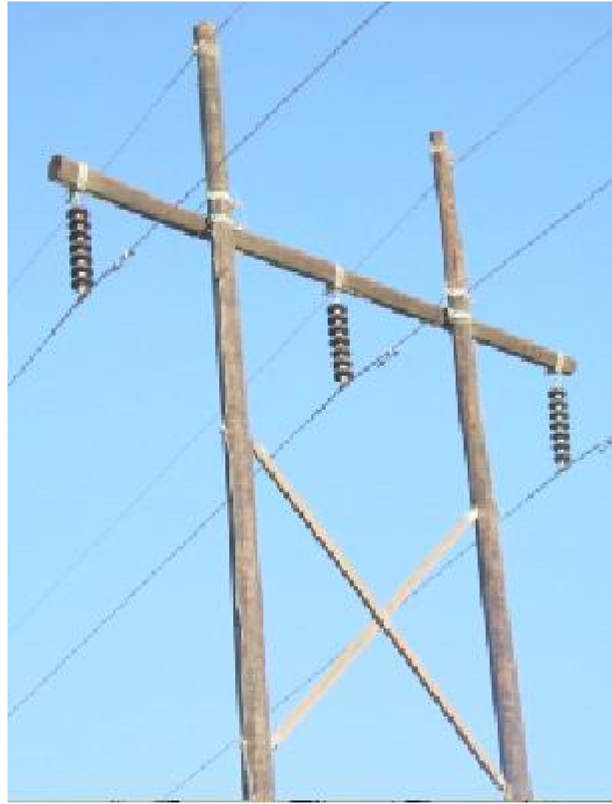
بعد قطع الخشب وتجفيفه وعمل التجاويف والنقر المطلوب لتثبيت الأذرع المستعرضة يتم معالجة الخشب بمشتقات قطران الفحم – عادة الكريوزوت - حتى يتشبع تماما وهذه المعالجة تجعل عمر الخشب يتراوح ما بين 40 - 50 سنة ما لم يهاجم بواسطة العفن أو نقار الخشب اللذان يمثلان أكبر عدوين للأعمدة الخشبية.



شكل (١- ١٩) – عمود خشبي في منظومات النقل الكهربائي

وتبعا لمتطلبات الحالات المختلفة يمكن استخدام الأعمدة الخشبية في صورة عمود مفرد كما في شكل (١- ١٩) أو في صورة تركيبات على شكل حرف **H** كما في شكل (١- ٢٠) . وتتميز الأعمدة المفردة بأن حق المرور المطلوب لها أقل ما يمكن في حين أن ما يحد استعمال الأعمدة الخشبية المفردة هو أقصى جهد يمكن وضعه على عمود مفرد والمسافة بين الموصلات وكذلك وزن الموصلات.

وتتميز تركيبات **H** بأنها متينة وقوية لدرجة تمكنها من تحمل وزن موصلات ذات مساحة مقطع كبيرة ولمسافات كبيرة بين كل برجين متتاليين ويمكن كذلك استخدامها لجهود مرتفعة وذلك للإمكانية المتاحة لديها من تثبيت الموصلات على مسافات أكبر، ويعيبها فقط أن متطلبات حق المرور لمثل هذه الأبراج أكبر.



شكل (١- ٢٠) – عمود خشبي على شكل H

وتتميز الأعمدة الخشبية إلى جانب ما ذكرناه بمقاومتها لمرور التيار ويمكن تصنيفها في حالة الجهود المنخفضة كمادة عازلة، وتتميز كذلك بسهولة تركيبها وبحاجتها إلى أساسات بسيطة لتثبيتها.

و عندما لا يمكن توفير الأعمدة الخشبية بطريقة اقتصادية وعندما تكون المتانة العالية مطلوبة تستخدم الأعمدة الخرسانية والمعدنية، وكذلك عندما يكون الشكل ذا أهمية كبرى حيث يمكن تصنيع الأعمدة الخرسانية والمعدنية بأشكال وألوان عديدة .

٢. الأعمدة الخرسانية : Concrete Poles

تصنع الأعمدة الخرسانية – وكذلك المعدنية - بمقاطع دائرية أو مربعة أو مضلعة (عادة ستة أو ثمانية أضلاع) ، وتكون مجوفة وذلك لتقليل وزنها الذي مازال يمثل عيبا كبيرا وخصوصا عند تداولها أثناء النقل والتثبيت. ويستغل التجويف داخل العمود في تمرير الكيابل التي تقوم بتوصيل الكهرباء من أو إلى أعلى العمود . وتستخدم أسياخ حديد طولية – عادة 8 أسياخ - لتقوية العمود وعادة ما تكون سابقة الإجهاد أي معرضة لإجهاد شد عند التصنيع والذي يعادله إجهاد الضغط الواقع على العمود بعد التركيب ، ويتم أيضا استخدام أسياخ تسليح عمودية في صورة حلزون ملفوف حول الأسياخ الطولية ويتم لحامه بطريقة تمنع حركة الأسياخ أثناء عملية صب الخرسانة. كل الأعمدة الخرسانية تكون مدببة أي تقل مساحة مقطعها مع ارتفاع العمود والأعمدة المضلعة والمربعة يتم شطف أركانها ويكون بالعمود فتحة لدخول الكيابل وفتحات تسمح بدخول يد العامل أو الفني لسحب وتركيب الكيبل في القلب المجوف للعمود. بالإضافة إلى ثقل وزنها فإن الأعمدة الخرسانية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية وهذا ما يحد من استخدامها وخصوصا عند توافر الأعمدة الخشبية .

وتتميز الأعمدة الخرسانية بالآتي:

- لا تتأثر الأعمدة الخرسانية بالتعفن ولا بالطيور ولا بالنار ولا تصدأ و كذلك لا تتأثر بالمواد الكيميائية .
- أقوى وأصلب من الخشب ولا تحتاج إلى صيانة
- تؤثر رطوبة التربة والجو تأثيرا سلبيا على الأنواع الأخرى من الأعمدة إلا أنها تعمل لصالح الأعمدة الخرسانية حيث تزيد صلابتها ومتانتها
- باعتبار عمر العمود فإن العمود الخرساني يعتبر الأقل تكلفة/السنة بالنسبة لباقي الأنواع من الأعمدة



شكل (١- ٢١)
الأعمدة الخرسانية



٣. الأعمدة المعدنية : Metallic Poles

تصنع الأعمدة المعدنية بأطوال مختلفة وسمك يعتمد على المتانة المطلوبة ، وتصنع في أشكال الأعمدة الخرسانية – دائرية أو مربعة أو مضلعة- وتكون مدببة كذلك ، وتكون عادة بلون المعدن المصنوعة منه ولكن يمكن طلاؤها بالألوان المطلوبة ، ويمكن تثبيتها في الأرض مباشرة ، أو في قواعد خرسانية ، أو بمسامير في ألواح معدنية مثبتة في قواعد خرسانية .

الأعمدة المعدنية ليس لها مرونة الأعمدة الخشبية ولا حتى عمرها الزمني حيث يتراوح عمر العمود المعدني من 25 حتى 30 سنة في حين يصل عمر العمود الخشبي من 40 – 50 سنة في حالة معالجتها بطريقة تمنع حدوث التعفن ويعتمد عمر العمود المعدني على سمك طبقة الجلفنة. والأعمدة المعدنية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية ولكن تصبح أكثر اقتصادية للأطوال من 90 – 130 قدم ، ويرجع السبب الرئيسي لاستخدام الأعمدة المعدنية إلى منظرها حيث يعتقد الكثير من الناس أن الأعمدة المعدنية لها شكل أكثر جاذبية أو قبولا من الأعمدة الخشبية ، وأكثر استخدامها في إنارة الطرق السريعة والشوارع والملاعب الرياضية وفي المناطق السكنية والتجارية ، ويمكن استخدامها في خطوط النقل في صورة أعمدة منفردة أو تكوينات من عمودين أو أكثر.

وتتميز الأعمدة المعدنية على الأعمدة الخشبية بسهولة النقل وخصوصا للأعمدة الطويلة حيث يمكن تصنيع العمود المعدني من عدة أجزاء يسهل نقلها ثم يتم تجميعها في موقع التركيب ، وأيضا لأنه يمكن تصنيع الأعمدة المعدنية في مواقع عديدة فيسهل نقل الأعمدة من أقرب مواقع التصنيع إلى موقع التركيب بعكس الأعمدة الخشبية التي تعتمد أماكن إنتاجها على أماكن توافر الأشجار.

٤. الأبراج الحديدية : Steel Towers

هي عبارة عن تركيب شبكي من عناصر من الصلب المجلفن والتي يتم تجميعها معا بصواميل ومسامير لتكون شكل البرج ، وتعتبر الأبراج الحديدية أكثر أنواع الأبراج استخداما حيث إنها :

- الأعلى من حيث نسبة المتانة/الوزن
- الأطول عمرا وذات تكلفة معقولة
- يمكن نقل مكونات البرج بسهولة وتجميعها بسهولة أيضا في مكان التركيب

ورغم أنها تحتاج إلى أساسات خاصة ولكنها غير باهظة التكاليف ولا صعبة التركيب. و تعتمد أبعاد البرج –ارتفاعه والمسافات بين الأذرع المستعرضة واتساعها - على مستوى الجهد ، ويعتمد تصميم البرج وطريقة تثبيته على موقعه من الخط. وأنواع الأبراج هي :

أ- برج تعليق/تثبيت **suspension/support tower**

وهو البرج الذي يستخدم لتعليق/تثبيت الموصلات وغالبية الأبراج الموجودة في مسار الخط تكون من هذا النوع ، ولا يبذل هذا البرج أي شد على الموصل فهو بمثابة نقطة تعليق/تثبيت فقط ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازل واحد لكل موصل . ويختلف برج التعليق عن برج التثبيت في وضع الموصل بالنسبة للعازل ، ففي برج التثبيت يكون العازل مثبتا رأسيا لأعلى ويكون السلك موضوعا فوق العازل أما في برج التعليق يكون العازل مثبتا رأسيا لأسفل ويكون السلك معلقا في أسفل العازل كما في شكل (١- ٢٢) وفي كلا النوعين لا يكون السلك مربوطا في العازل .

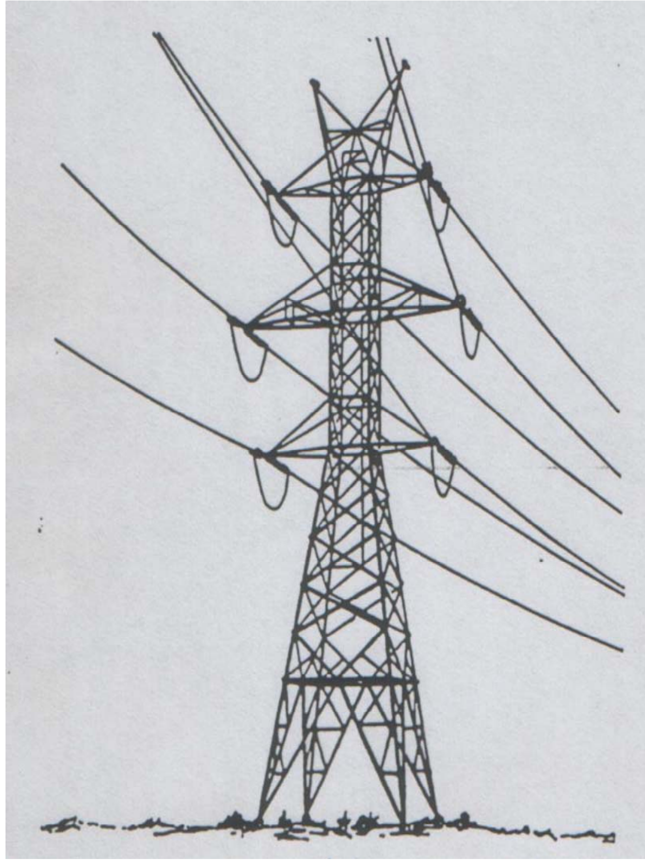


شكل (١- ٢٢) – برج تعليق على خط نقل كهربائي .

ب- برج الشد **Tension tower**

ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازلين عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطا بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطا بالعازل الثاني شكل (١- ٢٣) . ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق – كل عشرة أبراج في المتوسط – وذلك

لتفادي سقوط السلك من على الأبراج حالة حدوث قطع فيه . لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق/تثبيت و حدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج وسيلزم إعادة تركيب الموصلات على الأبراج وما يلزم ذلك من وقت طويل ومجهود كبير و تكلفة عالية. ولكن في وجود أبراج الشد لن يسقط إلا السلك في المسافة بين برجي الشد الذي حدث بينهما القطع في الموصل. ويكون هذا البرج معرضا لشد متساوٍ من كلتا جهتيه.



شكل (١- ٢٣) – برج شد على خط نقل كهربائي

ج_ برج الزاوية **Angle tower**

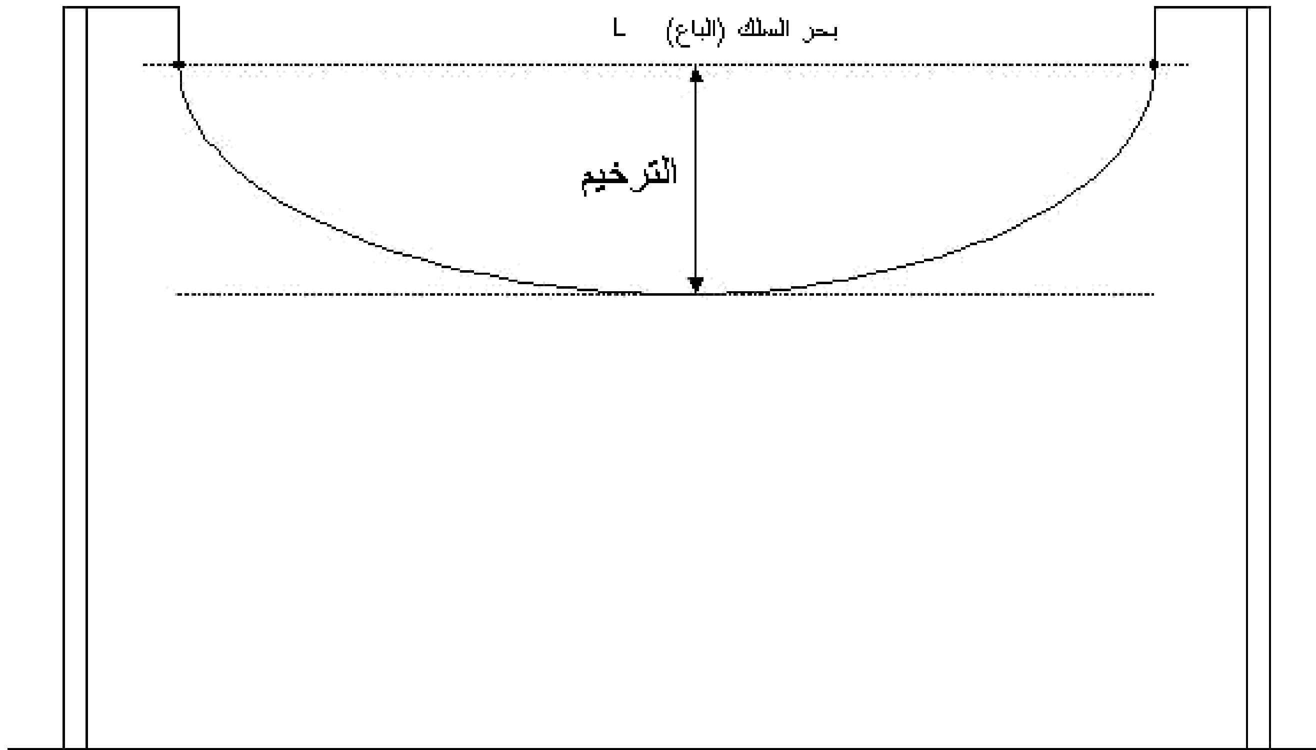
ويشبه إلى حد كبير برج الشد إلا أنه يستخدم عند حدوث تغير في اتجاه خط النقل ويكون طرفا السلك المربوطان به ليسا على استقامة واحدة مما يجعله معرضا لقوة شد تساوي محصلة الشد في الموصلين المربوطين فيه .

د_ برج النهاية **End tower**

وهذا النوع من الأبراج يوجد في بداية الخط وفي نهايته ويكون معرضا للشد من ناحية واحدة ويلزم أخذ هذا الشد في الاعتبار عند تصميم و تثبيت البرج.

١- ٢- ٤ : حسابات الترخيم في خطوط النقل الكهربائي :

في خطوط النقل الكهربائي تكون الموصلات معلقة على الأبراج عن طريق عوازل تعزلها عن جسم البرج، وفي المسافة بين برجين متتاليين والتي تعرف بالباع أو خطوة البرج أو بحر السلك يكون السلك معلقا تحت تأثير ثقله – و ثقل ما قد يتراكم عليه من ثلوج وتأثير ضغط الرياح إن وجدت – ويتخذ الموصل شكل منحنى تعليق السلاسل (Catenary's curve) ، كما هو موضح بشكل (١- ٢٤) والترخيم عند أية نقطة هو مقدار انخفاض هذه النقطة عن مستوى نقطة التعليق. وفي حالة كون نقطتي التعليق على نفس المستوى يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين البرجين. ونظرا لاهتمامنا بالترخيم الأقصى فقط حيث إنه هو الذي يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض فإنه عند إطلاق كلمة الترخيم فإننا نقصد بها الترخيم الأقصى وهو مقدار الانخفاض الحادث للسلك عند أقرب نقاطه من سطح الأرض.



شكل (١- ٢٤) – الترخيم في خط النقل الكهربائي

١- ٢- ٤- ١ : العوامل التي تؤثر في الترخيم :

يتأثر مقدار الترخيم بعدة عوامل نوجزها فيما يلي:

١. وزن السلك (w_c) وعادة ما يستخدم وزن السلك لكل وحدة طول كمقياس لوزن السلك، وكلما زاد وزن السلك زاد الترخيم
٢. المسافة بين البرجين (الباع L) وكلما زادت المسافة بين البرجين زاد الترخيم
٣. الشد في السلك (T) وهو من العوامل التي تؤثر تأثيرا كبيرا في مقدار الترخيم وكلما زاد الشد في السلك قل الترخيم
٤. العوامل البيئية كتراكم الثلوج على الأسلاك وضغط الرياح وسوف ندرس تأثير هذين العاملين بالتفصيل
٥. درجة الحرارة: كلما زادت درجة الحرارة تمدد السلك وزاد طوله وزاد الترخيم و يحدث العكس عند انخفاض درجة الحرارة

وحسابات الترخيم في خطوط النقل الكهربائي لها أهمية كبرى حيث إنه من خلال هذه الحسابات يمكن تحديد مقدار الخلوص بين السلك والأرض والتأكد مما إذا كان مطابقا لشروط الأمن والسلامة، وأيضا لأن الترخيم يؤثر في مقدار الشد الذي يتعرض له السلك فإنه يجب ضبط الخلوص عند تركيب الموصلات بحيث لا يتعدى الشد في الموصل القيمة المسموح بها حتى عند تعرض الأسلاك إلى أسوأ حالات التحميل الميكانيكي الممكنة.

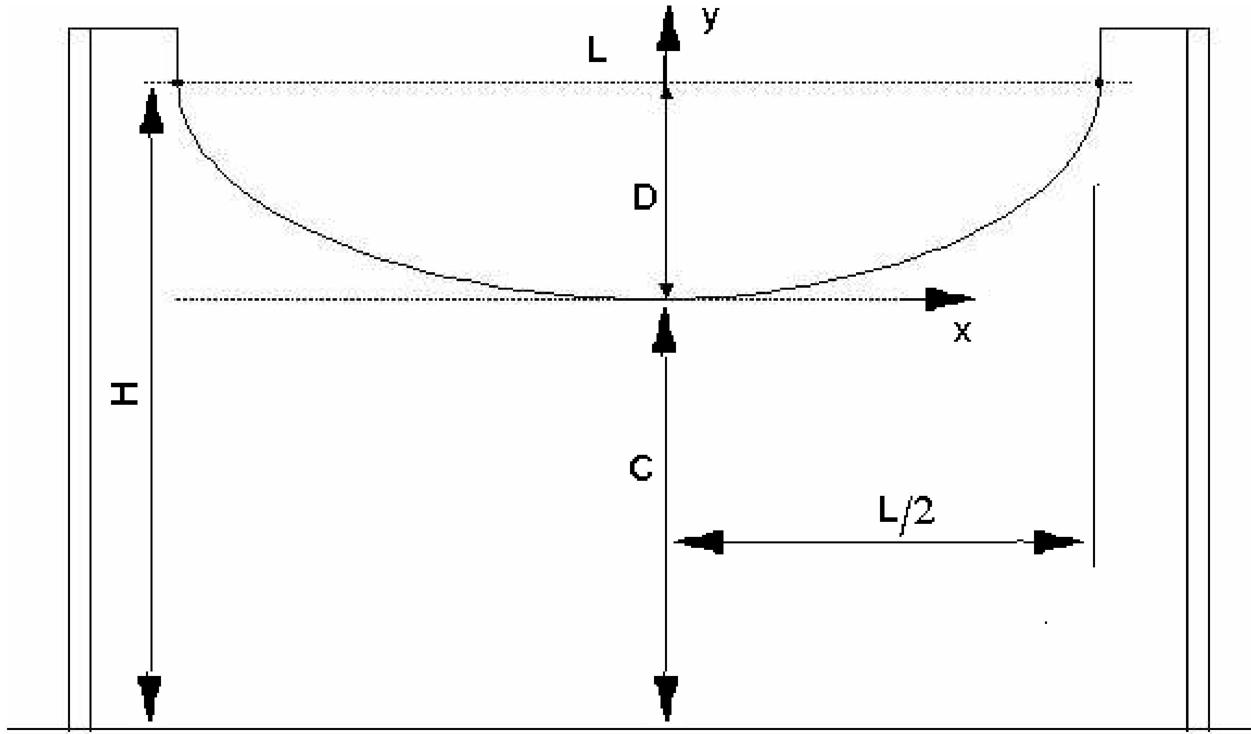
١- ٢- ٤- ٢ : حساب الترخيم بين برجين متماثلين :

عندما يكون البرجان متماثلين تكون نقاط تعليق الموصل على نفس الارتفاع وفي هذه الحالة يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين نقطتي التعليق. وكما ذكرنا سابقا فإن السلك يأخذ شكل منحنى تعليق السلاسل، وهذا المنحنى يمكن تقريبه دون التأثير بدرجة كبيرة في دقة الحسابات بمنحنى تربيعي، و إذا اعتبرنا أكثر النقاط انخفاضا هي نقطة الأصل فإن:

$$y = \frac{w_c x^2}{2T} \tag{1.91}$$

حيث w_c هو وزن الموصل لكل متر طولي مقدرا بالكيلوجرام/متر
T الشد في الموصل مقدرا بالكيلوجرام
x, y إحداثيات أية نقطة على الموصل بالنسبة لنقطة الأصل وكل منهما مقدر بالمتر

ومن شكل (١- ٢٥) نجد أن أقصى ترخيم (D) هو قيمة (y) عندما تكون $x = L/2$ حيث L هي الباع وبالتعويض في معادلة المنحنى نجد أن:



شكل (١- ٢٥) – الترخيم بين برجين متماثلين في خط النقل الكهربائي

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} \qquad (1.92)$$

والخلوص بين الموصل والأرض في هذه الحالة:

$$C = H - D \qquad (1.93)$$

حيث H هو ارتفاع نقطة التعليق عن سطح الأرض.

مثال ١- ٣ : لخط نقل كهربائي كانت المسافة بين البرجين هي 160 m ، ووزن الموصل 0.75 kg/m والشد في الموصل 600kg ، فإذا كانت نقطتا التثبيت على نفس الارتفاع H=20 m احسب الخلوص بين الموصل والأرض.

الحل

الخلوص = ارتفاع نقطة التثبيت – الترخيم

$$C = H - D$$

وحيث أن نقطتي التثبيت على نفس الارتفاع فإن:

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.75 \times (160)^2}{8 \times 600} = 4 \text{ m.}$$

ويكون الخلوص

$$C = 20 - 4 = 16 \text{ m}$$

مثال ١- ٤ : احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما 275 متر إذا كان وزن الموصل 0.85 كجم/متر وأقصى شد يتحمله الموصل هو 8000 كجم ومعامل الأمان المطلوب هو 2.

الحل

نحسب الشد المسموح به في الموصل :

$$\text{الشد المسموح} = \frac{\text{أقصى شد}}{\text{معامل الأمان}}$$

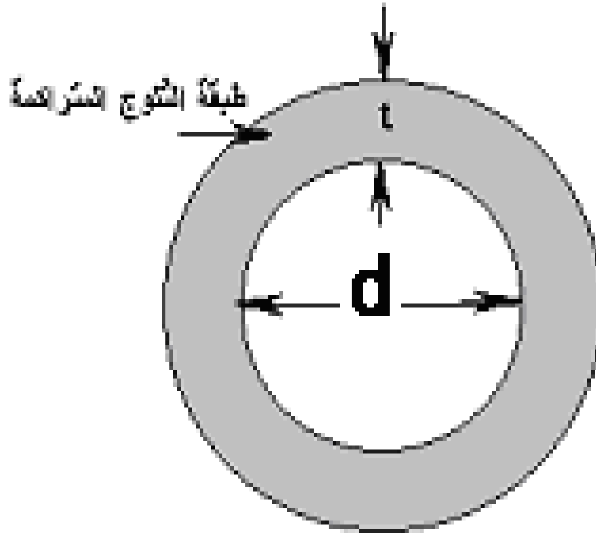
$$T = \frac{8000}{2} = 4000 \text{ kg}$$

نحسب الترخيم حيث $w_c = 0.85$ kg/m , $L = 275$ m , $T = 4000$ kg

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.85 \times (275)^2}{8 \times 4000} = 2 \text{ m}$$

١- ٢- ٤- ٣ : تأثير الثلوج على الترخيم :

عند تراكم طبقة من الثلوج سمكها (t) على سطح الموصل كما في شكل (١- ٢٦) فإنها تضيف وزنا إضافيا يؤثر إلى أسفل ويضاف إلى وزن الموصل ، وهذا الوزن هو عبارة عن وزن الثلج المتراكم. ولحساب هذا الوزن نحسب أولاً حجم طبقة الثلج المتراكم لوحدة الأطوال.



شكل (١- ٢٦) – الترخيم بين برجين متماثلين في خط النقل الكهربائي

حجم الثلوج المتراكمة/متر V_i :

$$V_i = \frac{\pi}{4}((d+2t)^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(2d+2t).2t$$

$$V_i = \pi(d+t).t$$

حيث d هو قطر الموصل.

ويكون وزن الثلوج المتراكمة w_i مساويا لهذا الحجم مضروبا في كثافة الثلج ρ :

$$w_i = \pi.\rho.(d+t).t \qquad (1.94)$$

وحيث إن وزن الثلج يؤثر رأسيا إلى أسفل في نفس الاتجاه مع وزن الموصل فستتم إضافته مباشرة إلى وزن الموصل ويصبح الوزن الفعلي مساويا وزن الموصل مضافا إليه وزن الثلج ويستخدم هذا الوزن الفعلي في حساب الترخيم بدلا من وزن الموصل فقط ، أي إن:

$$w_e = w_c + w_i \qquad (1.95)$$

مثال ١- ٥: احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما 180 متراً إذا كان وزن الموصل 0.624 كجم/متر والشد في الموصل هو 1220 كجم إذا كان سمك طبقة الثلوج المتراكمة على الموصل هو 0.3 سم ووزن الثلج هو 910 كجم/م٣ ، وقطر الموصل 0.94 سم .

الحل

نحسب وزن الثلوج المتراكمة على الموصل (w_i)

$$w_i = \pi.\rho.(d+t).t$$

$$= \pi * 910 * (0.94 + 0.3) * 10^{-2} * 0.3 * 10^{-2}$$

$$w_i = 0.106 \text{ kg / m}$$

ويكون الوزن الفعال للموصل

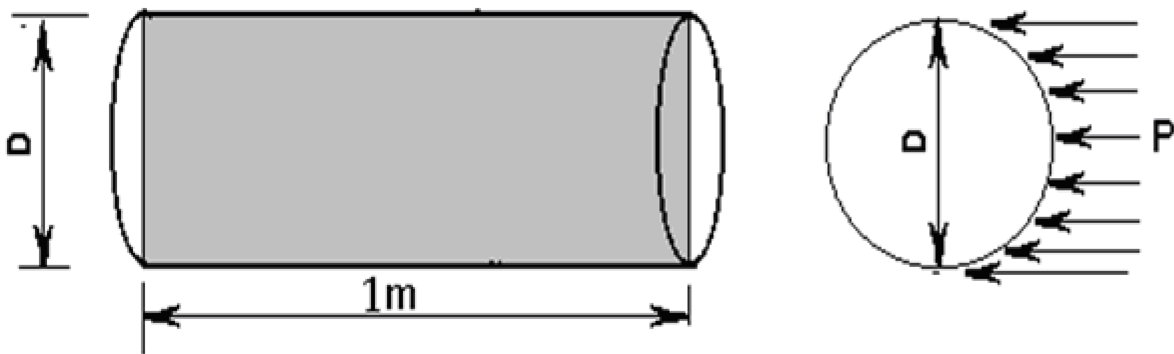
$$w_e = w_c + w_i = 0.624 + 0.106 = 0.73 \quad \text{kg/m.}$$

ويكون الترخيم :

$$D = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{0.73 * (180)^2}{8 * 1220} = 2.42 \text{ m}$$

١- ٢- ٤- ٤ : تأثير الرياح على الترخيم :

عند تعرض الموصلات لضغط رياح مقداره $P \text{ kg/m}^2$ فإنه يتعرض لقوة تؤثر عليه أفقيا مقدارها يساوي حاصل ضرب ضغط الرياح في المساحة المسقطة للموصل. المساحة المسقطة للموصل لكل متر طولي (A_p) - المساحة المظللة في شكل (١- ٢٧) تساوي عدديا قطر الموصل.



شكل (١- ٢٧) – المساحة المسقطة للموصل والمعرضة لتأثير الرياح

أي إن:

$$A_p = d \, . \, 1 \quad m^2$$

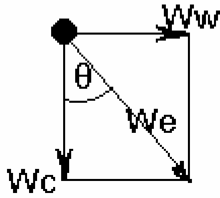
والقوة المؤثرة على الموصل نتيجة ضغط الرياح هي :

$$w_w = A_p . P = d . P \quad kg/m$$

وهذه القوة تؤثر أفقيا فيكون الوزن المحصل للموصل في هذه الحالة :

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2} \qquad (1.96)$$

ويستخدم هذا الوزن المحصل في حساب الترخيم D_e :



$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} \qquad (1.97)$$

والترخيم في هذه الحالة لا يكون رأسيا وإنما يميل بزاوية θ على الرأسي ، حيث :

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{w_w}{w_c}) \qquad (1.98)$$

ويكون الترخيم الرأسي D والالتواء الأفقي للموصل D_h هما مركبتا D_e في الاتجاهين الرأسي والأفقي على الترتيب أي إن:

$$D = D_e \cos(\theta) \quad , \quad D_h = D_e \sin(\theta) \qquad (1.99)$$

وفي حالة تعرض الخط لضغط الرياح بالإضافة إلى تراكم الثلوج عليه فإن:

$$w_e = \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2} \qquad (1.100)$$

حيث w_c هو وزن الموصل/متر

w_i هو وزن الثلوج المتراكمة/متر

w_w قوة ضغط الرياح/متر

مع الأخذ في الاعتبار سمك طبقة الثلج عند حساب المساحة المسقطة أي إن:

$$w_w = (d + 2t) . p \quad kg/m$$

ويتم حساب الترخيم بنفس الطريقة أي إن :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T}$$

وعلى ذلك يكون الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي كالتالي :

$$D = D_e \cos(\theta) \quad , \quad D_h = D_e \sin(\theta)$$

إلا أن زاوية الميل على الرأسي تختلف قليلا في هذه الحالة :

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{w_w}{w_c + w_i})$$

مثال ١- ٦ : خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	160 m
قطر الموصل	0.95 cm
وزن الموصل	0.65 kg/m
الشد في الموصل	602.5 kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره $40\ kg/m^2$

الحل

قوة ضغط الرياح لكل متر من طول الموصل :

$$w_w = d*1*p = 0.95*10^{-2}*1*40 = 0.38 \quad kg/m$$

ويكون الوزن المحصل للموصل :

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2} = \sqrt{(0.65)^2 + (0.38)^2} = 0.7529 \quad kg/m$$

وبالتالي نحسب الترخيم D_e وزاوية ميل الموصل على الرأسي θ :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{0.7529\times(160)^2}{8\times 602.5} = 4 \quad m.$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{w_c}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.38}{0.65}\right) = 30.31^\circ$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$D = D_e \cos(\theta) = 4\times\cos(30.31) = 3.45 \quad m.$$

ويكون الالتواء الأفقي:

$$D_h = D_e \sin(\theta) = 4\times \sin(30.31) = 2.02 \quad m.$$

مثال ١- ٧ : خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	275 m
قطر الموصل	19.5 mm
وزن الموصل	0.85 kg/m
الشد في الموصل	4000 kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره $39\ kg/m^2$ وكان سمك طبقة الثلوج المتراكمة على الموصل 13 mm ، كثافة الثلج 910 kg/m.

الحل

القطر الخارجي للموصل d_o في وجود طبقة الثلج :

$$d_o = d + 2t \quad = 19.5 + 2*13 \quad = 45.5\ mm$$

المساحة المسقطة لكل ١ متر من طول الموصل :

$$A_p = d_o *1 \quad = 45.5*10^{-3} \quad *1 = 0.0455\ m^2$$

قوة ضغط الرياح لكل 1 متر :

$$w_w = A_p * P \quad = 0.0455 \ *39 \ = 1.77\ kg/m$$

وزن الثلوج لكل متر :

$$w_i = \pi.\rho.(d+t).t = \pi * 910 * (19.5 + 13) * 13 * 10^{-6}$$
$$= 1.207 \quad kg/m$$

الوزن المحصل للموصل :

$$w_e = \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2} = \sqrt{(0.85 + 1.207)^2 + (1.77)^2}$$
$$= 2.714\ kg/m$$

وعلى ذلك يكون الترخيم كالتالي :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{2.714*(275)^2}{8*4000} = 6.4 \quad m.$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{w_c + w_i}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.77}{0.85 + 1.207}\right) = 40.71^\circ$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$D = D_e \cos(\theta) = 6.4 * \cos(40.71) \ = 4.85 \quad m.$$

والالتواء الأفقي:

$$D_h = D_e \sin(\theta) = 6.4 * \sin(40.71) = 4.17 \quad m.$$

وفي أحيان كثيرة تكون نقاط تعليق الموصل ليست على نفس مستوى الارتفاع لاختلاف ارتفاع البرجين كما يحدث عند عبور خط النقل لمجرى مائي أو عند الاضطرار إلى أن تكون المسافة بين برجين أكبر بكثير من الباع المتوسط فيلزم زيادة ارتفاع البرجين اللذين يثبتان الموصل خلال هذه المسافة الكبيرة عن ارتفاع الأبراج العادي، وتحدث هذه الحالة أيضا عند مرور خط النقل في منطقة جبلية أو هضابية حتى وإن كانت الأبراج لها نفس الارتفاع فإن اختلاف منسوب سطح الأرض يتسبب في أن تكون الأبراج ليست على مستوى واحد مما يجعل نقاط تثبيت الموصل على البرجين ليست على نفس المستوى كما لو كانت الأبراج مختلفة الارتفاع.

شبكات النقل الكهربائية

العوازل المستخدمة في شبكات القوى الكهربائية

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكتمل هذه الوحدة يكون المتدرب قادرا على:

٣. التعرف على الأنواع المختلفة للعوازل الكهربية المستخدمة في منظومة القوى الكهربية.

٤. التعرف على أنواع عوازل خطوط النقل الهوائية.

٣. كيفية حساب توزيع الجهد على سلسلة عوازل خطوط النقل وحساب كفاءة السلسلة.

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب : ٩ ساعات

الوسائل المساعدة :

١. استخدام التعليمات في هذه الوحدة .

٢. صور فوتوغرافية ورسوم توضيحية توضح

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

العوازل المستخدمة في شبكات القوى الكهربائية

٢- ١: مقدمة :

تنقسم العوازل المستخدمة في منظومة القوى الكهربية إلى ثلاثة أنواع هي العوازل الغازية والعوازل السائلة والعوازل الصلبة ولكل نوع أهميته واستخداماته وتطبيقاته في الحياة العملية وسوف نتناول في هذه الوحدة دراسة سريعة لكل من العوازل الغازية والعوازل السائلة بينما سنستفيض في تناول أنواع العوازل الصلبة والتي تستخدم في عزل خطوط النقل الهوائية عن أبراج النقل.

٢- ٢ : العوازل الغازية :

تستخدم العوازل الغازية بصورة كبيرة في المعدات الكهربائية وأهم هذه الغازات المستعملة هي الهواء وغاز سادس فلوريد الكبريت وبنسبة أقل النيتروجين والفريون وثاني أوكسيد الكربون ، وتحدث مختلف الظواهر داخل العوازل الغازية عندما يطبق عبرها جهد كهربائي حيث يسري تيار صغير جداً بين الأقطاب الكهربائية المعزولة بالغاز ، ويستعيد الغاز العازل خصائصه الكهربائية عند فصل المصدر ، على الجانب الآخر إذا كان الجهد كبيراً تزداد شدة المجال الكهربائي Electric Field Intensity (E=V/D kV/cm) ، ويحدث التأين ومن ثم يزداد التيار الساري بين الأقطاب زيادة كبيرة ويحدث الانهيار الكهربائي وعندئذ تحدث شرارة موصلة قوية بين الأقطاب ويسمى أقصى جهد يفقد بعده العازل خاصية العزل بجهد الانهيار للغاز العازل .

٢- ٢- ١: غاز سادس فلوريد الكبريت Sulfur hexafluoride (SF6) :

غاز سادس فلوريد الكبريت غاز خامل له خصائص جيدة كعازل وكوسط طافي للشرارة داخل قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت وتزداد قوة العزل بزيادة الضغط . ويستخدم الآن غاز سادس فلوريد الكبريت على نطاق واسع داخل المعدات الكهربائية مثل القواطع الكهربائية ، والمكثفات ، ومحولات التيار ، والكابل الكهربائية ، والمحطات المغلقة بالغاز وخطوط النقل الكهربائية المغلقة بالغاز ، وأطراف التوصيل .... وهكذا . ويتحول الغاز إلى الصورة السائلة عند قيمة منخفضة لدرجة الحرارة وتعتمد هذه الدرجة على ضغط الغاز .

- **قدرته على الانتقال الحراري :** قدرة غاز سادس فلوريد الكبريت على الانتقال الحراري تعادل من 2 إلى 2.5 مرة القدرة على الانتقال الحراري للهواء عند نفس الضغط لذلك لنفس حجم الموصل سعة التيار تكون أكبر .

- **الخصائص الكيميائية :**

١. متزن كيميائياً حتى 500درجة مئوية .

٢. خامل وخمول الغاز الكيميائي ميزة كبرى للقواطع الكهربائية حيث لا تتعرض الأجزاء المعدنية والملامسات للتلف لعدم وجود الأكسدة للمعادن وبالتالي تقل عمليات الصيانة المطلوبة . وتؤثر الرطوبة بشكل فعال على خصائص الغاز ويتكون فلوريد الهيدروجين أثناء الشرارة داخل غاز سالب الكهربائية (Electronegative gas) .

٣. لا يتفاعل مع الأجزاء المعدنية حتى 500 درجة مئوية .

٤. يتحلل الغاز أثناء إطفاء الشرارة إلى رابع فلوريد الكبريت وثاني فلوريد الكبريت . وتتحد هذه الغازات مرة أخرى بعد إطفاء الشرارة وعملية التبريد لتكون الغاز الأصلي وأية مخلفات أخرى يمكن إزالتها بالمرشحات التي تحتوي على الألو مينا (Al_2O_3) . كما أن نتائج التحلل سامة ويمكن أن تهاجم بعض تركيبات المواد .

٥. الفلورايد المعدني مادة عازلة جيدة لذلك تستخدم بأمان للمعدات الكهربائية .

٦. احتواء الغاز على أية رطوبة أثناء ضخ الغاز من الخارج يوجد العديد من المشاكل الخطيرة لقواطع غاز سادس فلوريد الكبريت .

- **خصائص العزل الكهربائي :**

١. شدة العزل لغاز سادس فلوريد الكبريت عند الضغط الجوي حوالي 2.35 مرة أعلى من شدة عزل الهواء وأقل حوالي 30% من شدة عزل الزيت المستخدم في القواطع الزيتية .

٢. عند الضغط العالي تزداد شدة عزل الغاز وعند ضغط حوالي 3 كجم/سم^{٢} تكون شدة عزل الغاز أكبر من شدة عزل الزيت العازل وهذه الخاصية تتيح مسافات أصغر بين الموصلات الكهربائية وحجم أقل للمعدات الكهربائية لنفس الجهد .

٣. جهد الانهيار للغاز يعتمد على العديد من العوامل مثل شكل الموصلات الكهربائية ، وخشونة أسطح الموصلات ، وتوزيع المجالات الكهربائية ، وقرب عازلات التثبيت ، والرطوبة ، وشكل الموجات الكهربائية ... وهكذا . ويزداد جهد الانهيار للغاز مع زيادة ضغطه ويتبع الغاز قانون باشون (Paschen's Law) والذي ينص على أن جهد الانهيار للغاز في مجال كهربائي منتظم يتناسب تناسباً طردياً مع حاصل ضرب الغاز ومسافة الثغرة بين الأقطاب الكهربائية أي إن $V_b \alpha$ pd.

٤. منطقة الضغط الحرجة : إذا كان المجال الكهربائي غير منتظم فالعلاقة بين جهد الانهيار وضغط الغاز لا يتبع قانون باشون تماماً .

٥. تأثير سطح الموصل : خشونة سطح الموصل تقلل من جهد الانهيار للغاز حيث تتكون مجالات كهربائية قوية حول خشونة السطح تبدأ معها عمليات تأين قوية عند جهود منخفضة مثل التفريغ الهالي (Corona) مما يتسبب في حدوث الانهيار الكلي للغاز مبكراً لذلك لا بد أن تكون أسطح الموصلات ملساء .

٦. تأثير عوازل التثبيت على جهد الانهيار : الموصلات الكهربائية داخل المعدات المعزولة بالغاز تثبت على عوازل من الأيبوكسي أو البور سلين ويمكن حدوث الانهيار على أسطح العوازل ويمكن حدوث ذلك عند جهود قليلة إذا كانت أسطح العوازل مغطاة بالرطوبة والغبار الموصل لذلك يجب أن تكون العازلات نظيفة تماماً .

٧. الأطراف الحادة : الانهيار يبدأ عند الأطراف الحادة للأجزاء الموصلة والتي تتركز عندها المجالات الكهربائية العالية لذلك التنظيم الجيد لتوزيع الإجهادات الكهربائية مهم جداً للمعدات المعزولة بغاز سادس فلوريد الكبريت ويجب تجنب الأطراف الحادة .

٢- ٢- ٢ : الاعتبارات العلمية في استخدامات الغاز لأغراض العزل الكهربائي :

ظهرت في الأعوام القليلة الماضية أعمال كثيرة لتبني غاز معين للاستخدامات العملية ، ولكي يستخدم غاز معين في التطبيقات الكهربائية فإنه لا بد أولاً من الإلمام بمعلومات عن الغاز بما في ذلك تركيبه وما هي العوامل التي تؤثر على أدائه . وكلما زادت متطلبات التشغيل ، زادت المتطلبات الكثيرة والعنيفة التي تكون مطلوبة من الغاز العازل .

الخصائص المفضلة المطلوب توفرها في الغاز العازل لتطبيقات الجهد العالي هي :

١. شدة عزل عالية .
٢. اتزان حراري وعدم نشاط كيميائي تجاه المواد المستخدمة .
٣. غير قابل للاشتعال وغير ضار بالصحة العامة .
٤. درجة حرارة تكثيف أقل .
٥. انتقال حراري جيد .
٦. تكلفة اقتصادية متوسطة .

غاز سادس فلوريد الكبريت له معظم الخصائص السابقة الذكر وقد أخذ الكثير من الاهتمام في السنوات السابقة. كما تستخدم خلائط غاز سادس فلوريد الكربون مع النيتروجين أيضاً .

جدول (٢- ١) خصائص العازلات الغازية

أسم الغاز	التركيب الكيميائي	الوزن الجزيئي	درجة الانصهار عند 760 torr	درجة الغليان عند 760 Torr	شدة العزل النسبية $(N_s=1)$	ثابت العزل	الجاذبية النوعية الهواء=١	قابليته للاشتعال	سام
Air	- - -	29	- - -	-194	1	1.00059	1.00000	لا	خامل
Nitrogen	- - -	28	- - -	-196	1	1.00058	0.96724	لا	لا
Hydrogen		2		-253	--	1.00026	0.06952		
Carbon tetraflouride	N_2	88	-210	-128	1.01	1.00060	---------	نعم	لا
Hexafluoro-ethane	H_2	138	-259	-78	2.02	1.00200	- - -	لا	لا
Perfluoro-propane	CF_4	188	-183	-37	2.2	---------	- - -	لا	لا
Perfluoro-butane	C_2F_6	238	-101	-2	2.6	- - -			
Perfluoro-n-butane	C_3F_5	200	-160	+2	3.6	- - -	- -	لا	لا
Sulfur hexafluoride	$C4F_{16}$	146	-80	-63	62.5		- - -	لا	لا
$30\%SF_6 + 70\%$ Air	C_4F_3				2.0	- -	- - -	لا	لا
Freon-12	SF_6	121		-30	2.46	1.00340			
						1.00191	-	لا	لا
	CCl_9F_2		-158				- - -	لا	لا
						1.00160	- - -	لا	*
							- -		
							7.3323		
							5.1900		
							---------		

* خامل لمدة ساعتين أو أقل مع تركيز 20%

٢- ٣ : العوازل السائلة :

تستخدم العوازل السائلة في عزل كيابل الجهد العالي والمكثفات ولملء المحولات والقواطع . وبالإضافة لوظيفتها كعازل فلها وظائف أخرى مثل وسط ناقل للحرارة في المحولات وكوسط طافئ للشرارة في القواطع . ويعتبر زيت البترول من أكثر الزيوت استخداما كعوازل سائلة وتستخدم أيضا الهيدروكربونات الصناعية والهيدروكربونات الهالوجينية في بعض التطبيقات . وتستخدم زيوت السيليكون والهيدروكربونات التي تحتوي على الفلوريد للتطبيقات ذات درجات الحرارة العالية . وحديثا تستخدم بعض الزيوت النباتية والأسترات .

العوازل السائلة عادة ما تكون خليطاً من الهيدروكربونات الضعيفة الاستقطاب والتي يجب أن تكون خالية من الرطوبة ومنتجات الأكسدة والملوثات الأخرى والتي تؤثر تأثيراً كبيراً على شدة العزل للزيوت العازلة . ومن الخصائص الهامة المطلوبة للزيوت العازلة الموصلية الكهربائية وثابت العزل وشدة العزل . بالإضافة إلى ذلك فالخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل اللزوجة والاتزان الحراري والجاذبية النوعية هامة أيضا . عمليا يتم اختيار العازل السائل لتطبيق معين على أساس الاتزان الكيميائي .

وتعتمد آلية (ميكانيزم) الانهيار لتلك السوائل على عدة عوامل هامة مثل طبيعة وحالة الأقطاب الكهربائية والخصائص الفيزيائية للسائل والشوائب والغازات المتواجدة بالسائل .

١. وجود شوائب (Particles) : عند تطبيق جهد عالٍ ينشأ مجال كهربائي بين القطبين شدته E . وإذا كانت سماحية الشوائب (ε_1 Particles Prmitivity) أكبر من سماحية العازل السائل ε_2 ؛ تنشأ قوة تدفع بالشوائب للمساحة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن . فإذا كانت الشوائب كروية لها نصف قطر r فإن القوة تعطى بالعلاقة التالية $F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} . \nabla E^2$ وعندما تتجه هذه الشوائب باتجاه المنطقة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن فإنها تتابع حتى تصل ما بين القطبين مما ينشأ عنه توصيل ثم انهيار كهربائي Breakdown .

٢. وجود ماء : عند وجود قطرات من الماء في العازل السائل فإنها تستطيل في اتجاه المجال الكهربائي مما يؤدي إلى التوصيل بين القطبين وحدوث الانهيار الكهربائي .

٣. وجود فقاعات هوائية : توجد في بعض الأحيان فقاعات غازية في السائل العازل إما نتيجة لوجود شرخ في الإطار الخارجي أو وجود نتوءات في أحد الأقطاب . وعند تطبيق الجهد بين القطبين ينشأ مجال كهربائي شدته E=V/d (Kv/cm) وحيث إن شدة العزل للهواء أقل منه للعازل السائل فإن الوسط الغازي داخل الفقاعة الغازية سينهار مما ينشأ عنه شرارة كهربائية وبخار مما يؤدي إلى توليد المزيد من الفقاعات حتى تملأ الفراغ الموجود بين القطبين مما ينشأ عنه انهيار كامل للوسط العازل بين القطبين الكهربائيين .

جدول (٢- ٢) خصائص العزل لبعض العوازل السائلة

الخاصية	زيت المحولات	زيت الكابلات	زيت المكثفات	الأسكرال	زيوت السيليكون
- شدة العزل عند 20°C على 2.5mm موصلات كروية قياسية (kV/mm)	15	30	20	20-25	30-40
- النفاذية النسبية (50 Hz)	2.2 – 2.3	2.3 – 2.6	2.1	4.8	2.- 73.0
- Tan δ عند 50Hz	0.001	0.002	$0.25x10^{-3}$	$0.60x10^{-3}$	10^{-3}
عند 1 kHz	0.0005	0.0001	$0.10x10^{-3}$	$0.50x10^{-3}$	10^{-4}
- المقاومة النوعية (أوم.سم)	10^{12}-10^{13}	10^{12} - 10^{13}	10^{13} – 10^{14}	$2x10^{13}$	$3x10^{14}$
- الجاذبية النوعية عند 20°C	0.89	0.93	0.88–0.89	1.4	1.0 – 1.1
- اللزوجة عند 20°C	30	30	30	100 – 150	10 – 1000
- القيمة الحامضية (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
- معامل الانكسار	1.4820	1.4700	1.4740	1.6000	1.50–1.60
- التصبن (mg of KOH/gm of oil)	0.01	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01
- التمدد (20-100°C)	$7x10^{-4}$/°C	$7x10^{-4}$/°C	$7x10^{-4}$/°C	$7x10^{-1}$/°C	$5x10^{-4}$/°C
- أقصى محتوى مائي مسموح (ppm)	50	50	50	< 30 negligible	< 30 negligible

٢- ٤: العوازل الصلبة المستخدمة في خطوط النقل الهوائية :

لمنع تسرب التيار الكهربائي للأرض من نقاط تثبيت خطوط النقل أو التوزيع الكهربائية فإن كل هذه النقاط يجب تأمينها باستخدام عوازل صلبة بين الخطوط الكهربائية وأجسام الأبراج الحاملة لها . لذلك فإن العوازل الكهربائية الصلبة تلعب دوراً هاماً وحيوياً في التشغيل الآمن والناجح لخطوط النقل والتوزيع . والمتطلبات الرئيسة للعوازل الصلبة هي :

(أ) لا بد أن تكون قوية جداً ميكانيكاً .

(ب) يجب أن تكون شدة العزل لها عالية جداً .

(ج) لا بد أن توفر مقاومة عزل عالية جداً ضد تيار التسريب .

(د) خالية تماماً من الشوائب أو الشروخ الداخلية .

(هـ) يجب أن تكون غير مسامية .

(و) أن تكون مادته غير قابلة لنفاذ الغازات أو السوائل إلى داخل المادة .

(ز) لا تتأثر بتغير درجة الحرارة المحيطة .

(ح) أن تكون المادة العازلة مقاومة للانهيار الداخلي (puncture) وكذلك لانهيار السطح الكهربائي (flashover).

وباستعراض أسباب انهيار العوازل الهوائية الكهربائية ، نجد أن السطح هو المسبب الرئيسي لانهيار تلك العوازل . ويمكن أن يحدث هذا الانهيار بين الموصلات الكهربائية لخطوط النقل والأرض (التي هي عبارة عن البرج المعدني الحامل لخطوط النقل) ـ أي بين الموصل ومسمار ربط العازل ـ كما يحدث نتيجة للحرارة العالية جداً الناتجة عن الشرارة الكهربائية .

٢- ٤- ١ : مواد العوازل الكهربائية :

المواد التي تستخدم في تصنيع العوازل الكهربائية الصلبة لها متطلبات وخصائص معينة يجب أن تتوفر فيها ومن هذه المواد البورسلين. فالبورسلين (الخزف) هو المادة شائعة الاستعمال لكن بالإضافة للبورسلين يستخدم الزجاج الملدن والاسيتايت كما تستخدم أيضاً العوازل المصنوعة من اللدائن البيتروكيميائية . وسنستعرض عوازل البورسلين والزجاج الملدن والأسيتايت نظراً لكثرة استخدامها مقارنة بعوازل اللدائن ، وخاصة في المملكة .

(أ) عوازل البورسلين : شدة المجال الكهربائي التي يتحملها العازل دون انهيار في حدود 60kV/cm وقوة الضغط والشد الميكانيكي له في حدود $70{,}000\ Kg/cm^2$ و $500\ Kg/cm^2$.

(ب) العوازل الزجاجية : العوازل الزجاجية تستخدم في عمليات العزل الكهربائي حتى الجهود المتوسطة ويصبح الزجاج قاسياً بتقسية المادة حرارياً (annealing) ويكون له المميزات التالية :

١. شدة عزل عالية جداً في حدود 140 kV/cm من سمك المادة .
٢. يصبح للمادة مقاومية عالية جداً عندما تتقسى جيداً .
٣. يكون له معامل تمدد حراري منخفض .
٤. رخيص السعر مقارنة بالبورسلين .

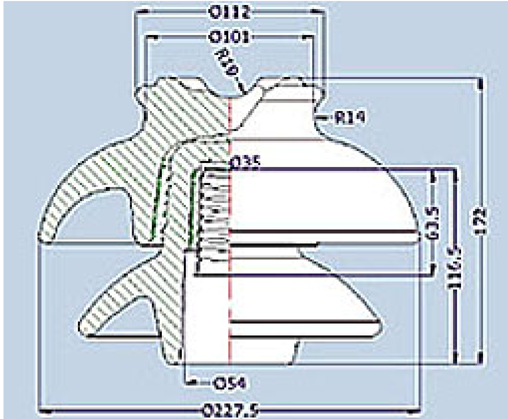
(ج) عوازل الأسيتايت : الأسيتايت هو سيليكات الماغنسيوم الموجودة بنسب مختلفة لأوكسيد الماغنسيوم والسيليكا في أجزاء كثيرة من العالم . وللأسيتايت قوة شد ميكانيكية عالية بالمقارنة بعازل البورسلين ويمكن استعمالها بكفاءة في أبراج الشد والتي تكون عند الدورانات الحادة للخط الكهربائي .

٢- ٤- ٢ : أنواع عوازل خطوط النقل الهوائية :

١. العوازل المسمارية.
٢. عوازل التعليق .
٣. عازل الإجهاد .
٤. عوازل الدعم .
٥. عوازل البكرة أو القعد .

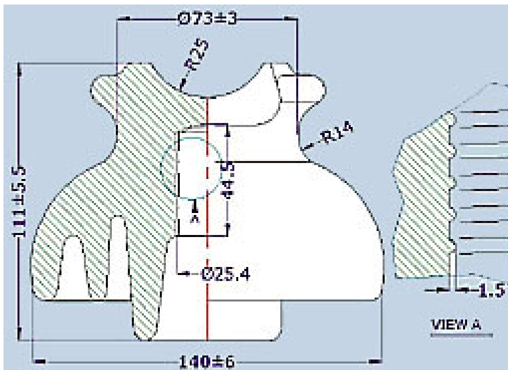
أولاً :- العوازل المسمارية (Pin type insulator) :

إن تصميم هذا النوع من العوازل و المستخدم لتثبيت موصلات الخط قديم جداً ويوضح الشكل قطعتين من العازل و مسمار التسرب على سطح العازل ، ولزيادة طول مسار التسرب يتم عمل مظلة (تجويف) أمطار واحدة أو اثنتين أو ثلاثة بالعازل.



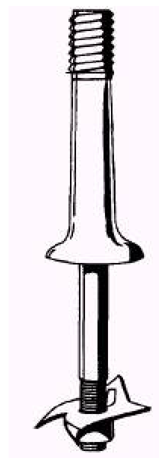


قطعة عازل مسماري جهد ٢٥ كيلو فولت





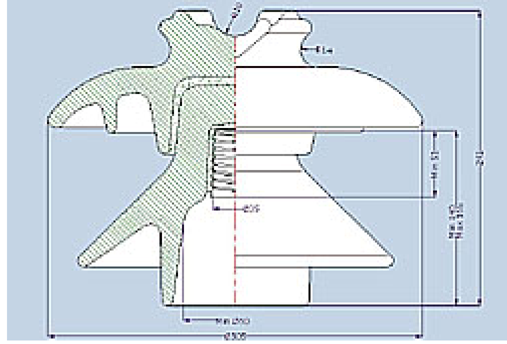
قطعة عازل مسماي جهد ١١ كيلو فولت



مسمار تثبيت من الحديد المجلفن

تتم قلوظة العازل المسماري ويتم ربطه بواسطة مسامير من الحديد المجلفن. تزداد سمك المادة المطلوبة لأغراض العزل عند الجهد العالي ، ولذلك نستخدم أجزاء متعددة من العازل المسماري عند الجهود العالية باستخدام الإسمنت البورتلاندي ويوضح الشكل أحد العوازل متعددة الأجزاء.

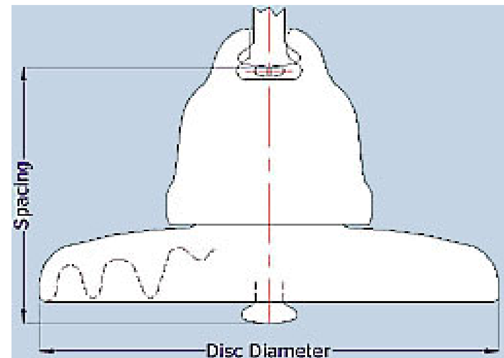




عازل مسماري من جزأين جهد ٣٣ كيلو فولت

ثانياً :- عوازل التعليق (Suspension type insulator) :

مع زيادة الجهد يصبح العازل المسماري ثقيلاً و معقداً في التركيب و تزداد تكلفته و أيضاً يكون تغيير القطع التالفة مكلفاً جداً، لذلك العازل المسماري غير اقتصادي للجهود العالية ، فعند الجهود العالية نستخدم عوازل التعليق ويربط عدد منها على التوالي برابط معدني لتكوين سلسلة و تعلق موصلات الخط الكهربائي في نهاية سلسلة العوازل ، ويوضح الشكل وحدة من النوع المستخدم للغطاء الإسمنتي و المستخدمة بكثرة لتعليق موصلات خطوط النقل الكهربائية.



وحدة عازل تعليق لخطوط النقل الكهربائي



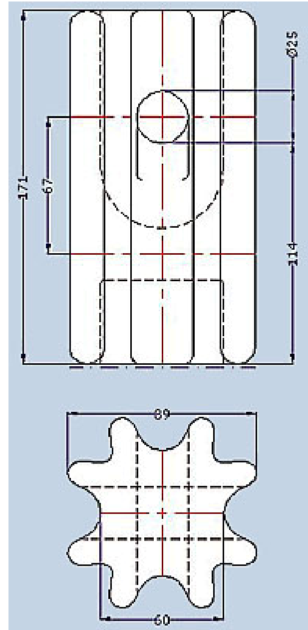
قطاع في عازل تعليق لخط نقل هوائي

ثالثاً :- عوازل الإجهاد :

عند طرف نهاية الخطوط الكهربائية أو وجود دوارنات للخط أو منحنى حاد للخط الكهربائي أو عبور الخط الكهربائي لنهر أو ما شابه يتعرض الخط لإجهاد ميكانيكي عال جداً . ففي الجهود المنخفضة يكمن استخدام عوازل القيد أو البكرة أما في خطوط الجهد العالي فنستخدم عوازل الإجهاد و التي تتكون من عوازل تعليق و هي عبارة عن خطين أو ثلاثة من عوازل التعليق متوازيين و مرتبطين ببعضهما .

رابعاً :- عوازل الدعم :

في الجهود المنخفضة تعزل شدات الأسلاك عن الأرض على ارتفاع أكبر من ١٣ متراً عن الأرض و يسمى العازل المستخدم في سلك الشد عازل الدعم من البورسلين و يصمم بحيث إنه في حالة انهيار العازل لا يسقط سلك التثبيت على الأرض .



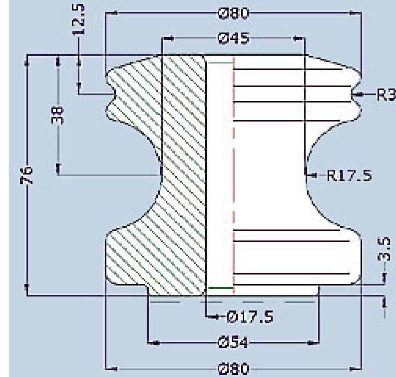


عوازل الدعم

خامساً :- عوازل البكرة و العقد:

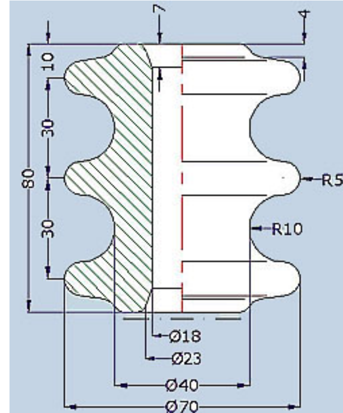
وتستخدم عادة في خطوط التوزيع الكهربائية ذات الجهود المنخفضة و تستخدم مثل هذه العوازل في الوضع الأفقي أو الوضع الرأسي و تثبت الموصلات الكهربائية للخط الكهربائي في تجويف العازل بمساعدة سلك ناعم مرن .





عوازل البكرة من طبقة واحدة





عوازل البكرة من طبقتين

٢- ٤- ٤ : أسباب انهيار عوازل خطوط النقل الهوائية :

إن من أسباب انهيار العوازل المستخدمة في خطوط النقل الهوائية ما يلي :

١. **كسر العازل** : السبب الرئيسي لكسر العازل هو الإجهادات الناتجة في عازل البورسلين من خلال التمدد غير المتساوي والانكماش الناتج في الإسمنت والبورسلين والصلب والذي تسبب فيه الحرارة الموسمية والبرودة والجفاف وتسخين العازل . ولتجنب مثل هذا الكسر أدخلت تحسينات كثيرة على العازل أحيانا بوضع وسادة بين الطبقات ومسمار التثبيت الصلب للسماح بمثل ذلك التمدد .

٢. **عيوب مادة العزل** : إذا كان بمادة العزل أي عيب ، مثل وجود فراغات أو وجود شوائب ، بأي مكان بها فإن هذا العيب يؤدي لكسر هذا العازل .

٣. **مسامية مادة العزل** : لو صنعت مادة البورسلين للعازل تحت درجات حرارة منخفضة فإن البورسلين يصبح مساميا ونتيجة لهذا يمتص البورسلين الرطوبة من الهواء ومن الإسمنت وتقل بصورة خطيرة شدة عزله ويبدأ تيار التسريب في السريان خلال العازل مما يؤدي لانهيار المادة العازلة .

٤. **الصقل غير الكافي** : إذا لم يتم صقل العازل بصورة كافية فإن الماء المتبقي على سطح العازل نتيجة الأمطار أو الندى يمكن أن يؤدي لتراكم الغبار على السطح مكونا مناطق موصلة كهربائيا تتسبب في خفض مسافة شرارة السطح للعازل والتي تتسبب في انهيار العازل .

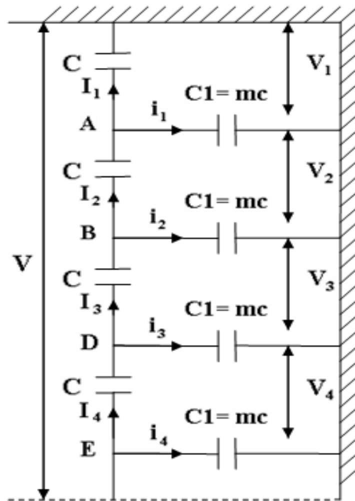
٥. **شرارة السطح** : لو حدثت شرارة على سطح العازل فإنها يمكن أن تؤدي إلى تسخين العازل تسخيناً زائداً وبالتالي تؤدي لانهياره .

٦. **الإجهاد الميكانيكي** : في بعض الأحيان يمكن أن يؤدي شد العازل إلى إجهاد العازل ميكانيكياً إذا كانت مادة العزل بها عيوب وبالتالي تؤدي إلى كسره .

٧. **القصر** : أحياناً تتسبب الطيور الضخمة في حدوث شرارة ومن ثم يمكن أن يؤدي ذلك لانهيار العازل (وهذا محتمل فقط إذا كانت المسافة بين الموصلات قليلة) .

٢- ٥ : توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة :

نفرض أن هناك سلسلة من العوازل المعلقة تحتوي على خمس وحدات عزل ، جزء البورسلين ينحصر بين معدني الربط لذلك فهي تكون مكثف سعته C فاراد و تسمى السعة المتبادلة . بالإضافة لهذه السعة هناك سعة بين كل معدن ربط و الذراع المعدني للبرج أي إن بين معدن ربط العوازل و الأرض و في هذا المكثف يكون الهواء هو العازل . وهنا أيضاً سعة بين معدن الربط و موصل الخط ولكن قيمتها صغيرة جداً ويمكن إهمالها.



توزيع الجهود على وحدات سلسلة العوازل

نفرض أن سعة وحدة العزل هي C

ونفرض أن السعة مابين الرابط المعدني و الأرض (السعة للأرض) هي C_1

m هي النسبة ما بين السعة للأرض إلى سعة الوحدة

$$\therefore m = \frac{C1}{C} \rightarrow \therefore C1 = mC$$

الممانعة السعوية لوحدة العزل هي $Xc = \frac{1}{\omega c}$

الممانعة السعوية للسعة للأرض هي $Xmc = \frac{1}{\omega mc}$

- عند نقطة A بتطبيق قانون كيرشوف

$$I_2 = I_1 + i_1 \qquad (2.1)$$

ويمكن الحصول على قيمة كل تيار كما يلي

$$I_2 = \frac{V_2}{X_c} = \frac{V_2}{\frac{1}{\omega c}} = \omega c V_2$$

$$I_1 = \frac{V_1}{X_c} = \frac{V_2}{\frac{1}{\omega c}} = \omega c V_1$$

$$i_1 = \frac{V_1}{X_{mc}} = \frac{V_1}{\frac{1}{\omega mc}} = \omega mc V_1$$

وبالتعويض في المعادلة رقم (2.1)

$$\therefore \omega c V_2 = \omega c V_1 + \omega mc V_1$$

$$\omega c V_2 = \omega c V_1 (1+m)$$

$$V_2 = V_1 (1+m)$$

$$V_2 = V_1 (1 + m)$$

وبنفس الطريقة يمكن الحصول على V_3

- عند نقطة B و بتطبيق قانون كيرشوف للتيارات

$$I_3 = I_2 + i_2 \qquad (2.2)$$

ويمكن الحصول على قيمة كل تيار كما يلي

$$I_3 = \frac{V_3}{X_c} = \frac{V_3}{\frac{1}{\omega c}} = \omega c V_3$$

$$I_2 = \frac{V_2}{X_c} = \frac{V_2}{\frac{1}{\omega c}} = \omega c V_2$$

$$i_2 = \frac{V_1 + V_2}{X_{mc}} = \frac{V_1 + V_2}{\frac{1}{\omega mc}} = \omega mc(V_1 + V_2)$$

وبالتعويض في المعادلة رقم (2.2)

$$\therefore \omega c V_3 = \omega c V_2 + \omega mc(V_1 + V_2)$$

$$\omega c V_3 = \omega c V_1(1+m) + \omega mc V_1 + \omega mc V_2$$

$$V_3 = V_1(1+m) + mV_1 + mV_1(1+m)$$

$$V_3 = V_1(1+3m+m^2)$$

$$V_3 = V_1(1+3m+m^2)$$

وبنفس الطريقة يمكن الحصول على كل من V_4 , V_5 كما يلي :

$$V_4 = V_1(1+6m+5m^2+m^3)$$

$$V_5 = V_1(1+10m+15m^2+7m^3+m^4)$$

وبناء على ذلك يمكن حساب الجهد الكلي على السلسلة كما يلي :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

وبالتعويض عن قيم كل الجهود يمكن الحصول على الجهد الكلي كما يلي:

$$V = V_1(5+20m+21m^2+8m^3+m^4)$$

مع ملاحظة أن

V = جهد الوجه وبالتالي يمكن الحصول على جهد الخط كما يلي :

$\therefore$ جهد الخط $= V2 = V \times \sqrt{3}$

مثال ١. إذا كانت سلسلة العوازل مكونة من خمسة عوازل وبفرض أن $m=0.1$ أوجد توزيع الجهود على وحدات السلسلة كنسبة من الجهد الكلي.

$V = V_1(5 + 20m + 21m^2 + 8m^3 + m^4)$

$V = V_1(5 + 20(0.1) + 21(0.1)^2 + 8(0.1)^3) + (0.1)^4)$

$V = V_1(5 + 2 + 0.21 + 8 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-4})$

$\therefore V = V_1\,(7.2181)$

$\therefore V_1 = 0.1386\ V$

$V_2 = V_1(1 + m)$

$V_2 = 0.1386\,(1 + 0.1)$

$V_2 = 0.1386 \times 1.1$

$\therefore V_2 = 0.15246\ V$

$V_3 = V_1(1 + 3m + m^2)$

$V_3 = 0.1386\,(1 + 3(0.1) + (0.1)^2)$

$V_3 = 0.1386 \times 1.31$

$\therefore V_3 = 0.1815\ V$

$V_4 = V_1(1 + 6m + 5m^2 + m^3)$

$V_4 = 0.1386(1 + 6(0.1) + 5(0.1)^2 + (0.1)^3)$

$V_4 = 0.1386 \times 1.651$

$\therefore V_4 = 0.2288\ V$

$V_5 = V_1(1 + 10m + 15m^2 + 7m^3 + m^4)$

$V_5 = 0.1386(1 + 10(0.1) + 15(0.1)^2 + 7(0.1)^3 + (0.1)^4)$

$V_5 = 0.1386 \times 2.1571$

$\therefore V_5 = 0.2987\ V$

٢- ٦ : كفاءة السلسلة :

وحدة العازل في السلسلة المجاورة للموصل الكهربائي يقع عليها أكبر فرق جهد و بالتالي فهي معرضة للإجهاد الكهربائي العالي و الذي يمكن أن يؤدي إلى انهيارها.

$$\text{كفاءة السلسلة} = \frac{\text{الجهد الواقع على السلسلة}}{n \times \text{الجهد الواقع على وحدة العزل الملاصقة للخط}}$$

حيث إن الـ n = عدد وحدات العازل في السلسلة

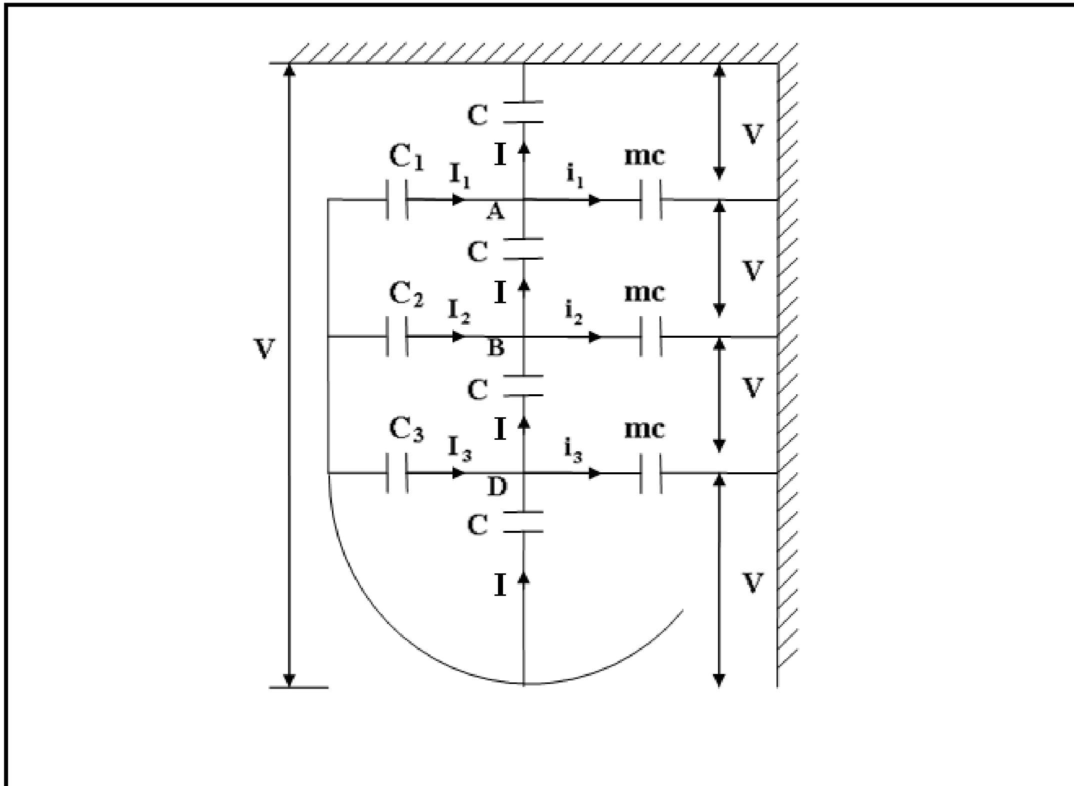
إذا كان n = 5

كفاءة السلسلة = $\frac{V}{V5\times5}$

٢- ٧ : طرق زيادة كفاءة سلسلة العوازل :

هناك ثلاث طرق لزيادة كفاءة السلسلة هي :

١. تقليل قيمة m
٢. بتدرج العوازل.
٣. باستخدام حلقة الحماية Guardring



استخدام حلقة الحماية لمساواة الجهود على وحدات السلسلة العازلة

عند النقطة **A**

$$I + I_1 = I + i_1$$

$$\therefore I_1 = i_1 \rightarrow ①$$

$$i_1 = \frac{V}{X_{mc}} = \omega mcV$$

$$I_1 - \frac{3V}{X_{C1}} - \omega c_1(3V)$$

- بالتعويض في ①

$$\therefore \omega c_1(3V) = \omega mcV$$

$$3C1 - mc$$

$$\therefore C1 = \frac{1}{3}mc \quad \text{I}$$

عند النقطة B

$$I + I_2 = I + i_2$$

$$\therefore I_2 = i_2 \rightarrow ②$$

$$I_2 = \frac{2V}{X_{c2}} = \omega c_1(2V)$$

$$i_2 = \frac{2V}{X_{mc}} = \omega mc(2V)$$

- بالتعويض في ②

$$\therefore \omega c_2(2V) = \omega mc(2V)$$

$$\therefore C2 = mc \quad \text{II}$$

عند النقطة D

$$I + I_3 = I + i_3$$

$$\therefore I_3 = i_3 \rightarrow ③$$

$$I_3 = \frac{V}{X_{c3}} = \omega c_3V$$

$$i_3 = \frac{3V}{X_{mc}} = \omega mc(3V)$$

- بالتعويض في ③
-

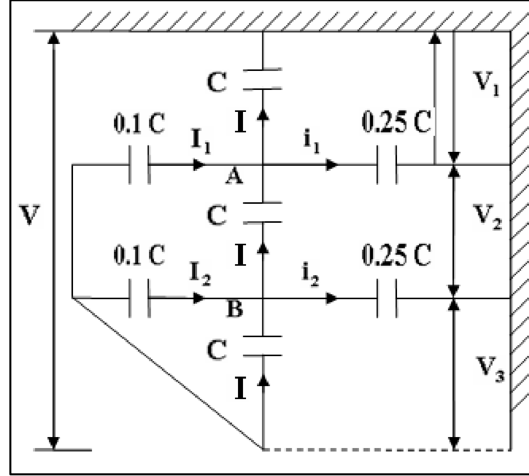
$$\therefore \omega c_3V = \omega mc(3V)$$

$$\therefore C3 = 3mc \quad \text{III}$$

مثال١ : سلسلة من العوازل مكونة من ٣ وحدات احسب :

أ- الجهد على كل وحدة منسوبا إلى جهد الوجه للخط الكهربائي.

ب- كفاءة السلسلة.



$$\therefore I_1 = V_1\omega C$$
$$i_1 = 0.25\,V_1\omega C$$
$$i_x = 0.1(V_1 + V_2)\omega C$$
$$\therefore I_2 = V_2\omega C$$
$$i_2 = 0.25\,(V_1 + V_2)\omega C$$
$$i_y = 0.1\,V_3\omega C$$
$$\therefore I_3 = V_3\omega C$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة A فإن :

$$\therefore I_2 + i_x = I_1 + i_1$$

$$\therefore I2 = 0.1\,\omega C\,(V1 + V2) = V1\omega C + 0.25\,V1\omega C$$

أو

$$\therefore V_2\omega C + 0.1\,\omega C\,(V_1 + V_2) = V_1\omega C + 0.25\,V_1\omega C$$

$$\therefore V2 + 0.1\;\;V2 + 0.1\;\;V3 = 1.25\,V1$$
$$1.25\,V_1 - 1.1\,V_2 - 0.1\;\;V_3 - 0$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة B فإن :

$$\therefore I_3 + i_y = I_2 + i_2$$

$$V_2\omega C + 0.1\,V_3\omega C = V_2\,\omega C + 0.25\,(V_1 + V_2)\,\omega C$$

$$1.1\,V_3 = 0.25\,V_1 + 1.25\,V_2$$

$$0.25\,V_1 + 1.25\,V_2 - 1.1\,V_3 = 0$$

بضرب المعادلة

$$13.75\,V_1 - 12.1\,V_2 - 1.1\,V_3 = 0$$

بطرح المعادلة

$$13.5\,V_1 - 31.35\,V_2 = 0$$

$$V_1 = \frac{31.35\,V_2}{13.5} = 0.988 V_2$$

بضرب المعادلة

$$1.25\,V_1 + 6.25\,V_2 - 5.5\,V_3 = 0$$

بطرح المعادلة

$$7.35\,V_2 - 5.4\,V_3 = 0$$

$$V_3 = \frac{7.35\,V_2}{5.4} = 1.362\,V_2$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$= 0.988\,V_2 + V_2 + 1.362\,V_2$$

$$= 3.35 V_2$$

$$V_2 = 0.2985\,V$$

$$V_1 = 0.2985 \times 0.988\,V = 0.295\,V$$

$$V_2 = 1.362 \times 0.2985\,V = 0.4065\,V$$

$$V_1 - 29.5\,\%$$

$$V_2 = 29.85\,\%$$

$$V_3 = 4065\,\%$$

كفاءة السلسلة = ع حيث عند :

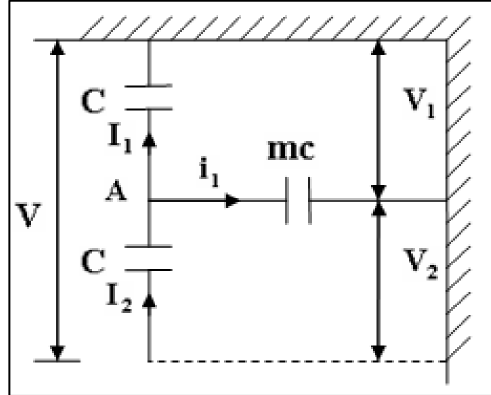
$$\text{كفاءة السلسلة} = \frac{\text{الجهد الواقع على السلسلة}}{n \times \text{الجهد الواقع على وحدة العزل الملاصقة للخط}}$$

$$\text{كفاءة الخط}\ \%\eta = \frac{V}{3 \times V_3} \times 100 = \frac{V}{3 \times 0.4065} \times 100 = 82.1\%$$

مثال٢ : احسب أقصى جهد تتحملها سلسلة عوازل إذا كان أقصى جهد لكل وحدة من السلسلة لا يزيد عن 17 KV وكانت السعة بين كل وصلة معدنية و الأرض 20% من السعة الذاتية للعازل . إذا كانت سلسلة العوازل مكونة من :

أ- وحدتين.

ب- ثلاث وحدات.



(أ) $V_2=17$, $m=20\%$

$V_2=V_1(1+m)$

$17=V_1(1+0.2)$

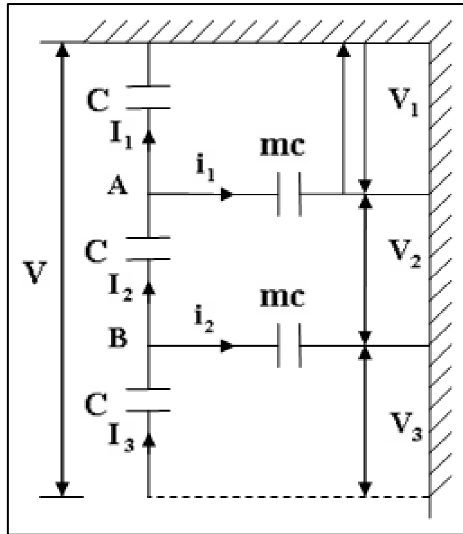
$$V_1=\frac{17}{1.2}=14.16\,Kv$$

$V=V_1+V_2=14.16+17=31.16$ KV

$\therefore$ الجهد الخط $=V_2=\sqrt{3}\times 31.16=53.97\,Kv$

$$\text{كفاءة الخط}\ \%\eta=\frac{V}{2\times V_2}\times 100=\frac{31.16}{2\times 17}\times 100=91.64\%$$

(ب) $V3=17$, $m=0.2$



$$V_3-V_1(1+3m+m^2)$$

$$17=V_1(1+3(0.2)+(0.2)^2)$$

$$17=V_1(1.64)$$

$$V_1=\frac{17}{1.64}=10.36\,Kv$$

$$V_2=V_1(1+m)=10.36(1+0.2)=12.43\,Kv$$

$$\therefore V=V_1+V_2+V_3=10.36+12.43+17=39.79\,Kv$$

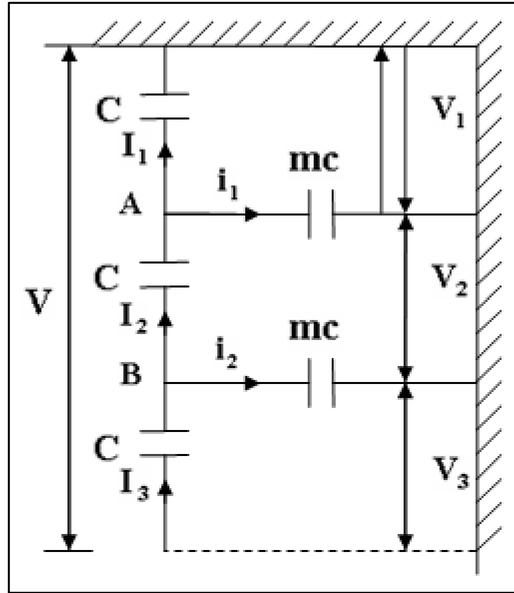
$$\text{كفاءة الخط}\ \%\eta=\frac{V}{3\times V_3}\times 100=\frac{39.79}{3\times 17}\times 100=78\%$$

مثال٣ : خط نقل ثلاثي الأوجه مثبت بواسطة سلسلة عوازل تحتوي على ثلاث وحدات عازل على العازل الأول و الثاني هو 8 و 11 KV على التوالي . اسحب :

أ- النسبة بين السعة الرابط المعدني و الأرض إلى السعة الذاتية للعازل.

ب- جهد الخط .

ت- كفاءة السلسلة



(أ) V_2=11KV , V_1=8KV

$$V_2 = V_1(1+m)$$
$$11 = 8(1+m)$$
$$11 = (8+8m)$$
$$11-8 = 8m$$
$$3 = 8m$$
$$m = \frac{3}{8} = 0.375$$
$$V_3 = V_1(1+3m+m^2)$$

(ب) V_3=17KV , m=0.2

$$V_3 = 8(1+3(0.375)+(0.375)^2)$$
$$V_3 = 8(2.26)$$
$$V_3 = 18.12\ Kv$$
$$\therefore V = V_1 + V_2 + V_3 = 8 + 11 + 18.12 = 37.12Kv$$
$$\therefore \text{الجهد الخط} = V_L = \sqrt{3}\times V = \sqrt{3}\times 37.12 = 64.29\ Kv$$

(ج)

$$\text{كفاءة الخط}\ \%\eta = \frac{37.12}{3\times 18.12}\times 100 = 68.28\%$$

مسائل

١) خط نقل ثلاثي الأوجه جهد 66 كيلو فولت محمول بسلسلة عوازل مكونة من خمس وحدات تعليق النسبة بين سعة كل عازل إلى السعة للأرض هي 4:1 احسب الجهد عبر كل وحدة عازل وكفاءة السلسلة بفرض عدم وجود تسريب :

[3.32kv,4.16kv,6.16kv,936kv,15.1kv,50.4%]

٢) احسب توزيع الجهد وكفاءة السلسلة لأربع وحدات عازل تعليق إذا كانت السعة بين الغطاء المعدني والأرض السعة للخط وهي 25% و 10% من سعة العازل على الترتيب .

[0.2159v,0.1914v,0.2341v,0.3586v 69.7%]

٣) موصلات قضبان توزيع لمحطة محولات جهد عال مفتوحة مثبتة بعوازل تثبيت . كل وحدة من العوازل تتكون من ثلاث وحدات عازل تعليق مثبته على بعضهما . الجهد عبر العازل الثاني 21.6كيلو فولت . إذا كان النظام الثلاثي الأوجه ثلاثي الموصلات أوجد الجهد بين قضبان التوزيع .

[114.25kv]

٤) سلسلة عوازل مكونة من ثلاث وحدات . السعة بين كل غطاء معدني والأرض تساوي 1/6 سعة العازل . إذا كان أقصى جهد مسموح به للعازل لا يزيد عن 35كيلو فولت . حدد أقصى جهد تعمل عنده سلسلة العوازل وكفاءة السلسلة .

[48.64kv,80.5%]

٥) سلسلة عوازل تعليق تتكون من ست وحدات . سعة العازل والسعة بين الغطاء المعدني والأرض هي C و 0.2C على الترتيب احسب : توزيع الجهد على الوحدات من أعلى لأسفل نسبة من الجهد الكلي وكفاءة السلسلة .

[6.43%,7.72%,10.56%,15.54%,23.5%,36.25%,46%]

شبكات النقل الكهربائية

الكيابل الكهربائية

الجدارة :

الأهداف :

عندما تكمل هذه الوحدة تكون :

١. ملما بأنواع الكابلات الكهربائية وطرق حساب عناصرها

٢.قد تعلمت استعمال الجداول لاختيار الكابلات وحساب خصائصها

١. ملما بأنواع الأخطاء التي تحدث في الكابلات وأسبابها وكيفية تحديد أماكن حدوثها

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب : ١٢ ساعة

الوسائل المساعدة :

١. استخدام التعليمات في هذه الوحدة .

٢. صور وبيانات عن أنواع الكابلات المختلفة وكذلك عن الأجهزة الحديثة لتحديد أماكن الأخطاء في الكابلات

متطلبات الجدارة :

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

الفصل الثالث : الكيابل الكهربائية

٣- ١: مقدمة :

الكيابل الكهربائية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل وتوزيع الطاقة الكهربائية وقد درسنا في الوحدة السابقة خطوط النقل الهوائية كوسيلة أخرى لنقل وتوزيع الطاقة الكهربية، والفارق الجوهري بين الخطوط الهوائية والكابلات هو أن الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون موصلات مكشوفة أي غير معزولة ويتم تثبيتها على أبراج للمحافظة على مسافات فاصلة ثابتة بين الموصلات وبين الموصل والأرض، في حين أن الموصلات المستخدمة في الكابلات تكون مغطاة بأكملها بمادة عازلة بالطبع ما عدا عند النهايات حيث التوصيلات بباقي أجزاء منظومة القوى ، ويتم تمديد هذه الكابلات إما بالدفن المباشر في الأرض، أو داخل مواسير مدفونة في الأرض أو خلال مجار تحت سطح الأرض مهيأة خصيصا لهذا الغرض، أو تمدد محمولة على صوان (trays) سواء كانت هذه الصواني مفتوحة أو مغلقة. والكابلات بهذه الطريقة أكثر أمانا من الخطوط الهوائية حيث إن احتمالات تلامس الأفراد أو الطيور والزواحف والحيوانات الصغيرة أو الأجسام المعدنية مع الموصلات الحاملة للجهد الكهربائي تكون ضئيلة جدا مما يحافظ على سلامة الأشخاص وأيضا تقليل فرص تعرض الكيبل للأخطاء، أي إن الكابل أكثر أمانا من الخط الهوائي وهذه هي أهم مميزات الكابلات على خطوط النقل الهوائية.

والاختيار بين الكابلات الأرضية والخطوط الهوائية لا يتم وفقا لمعيار واحد ولكنه يخضع – إلى جانب اعتبارات الأمان - لعدة عوامل اقتصادية وفنية عديدة أهمها:

تكلفة الموصل: لنقل نفس القدرة يكون الموصل المستخدم في خط النقل أقل تكلفة من الموصل المستخدم في الكابل حيث إن السعة الأمبيرية للموصلات المكشوفة المستخدمة في خطوط النقل تكون أكبر بكثير من السعة الأمبيرية للموصل داخل الكابل وبالتالي يكون موصل خطوط النقل أصغر حجما وأقل تكلفة من موصل الكابل.

تكلفة العازل: تكلفة العازل في الكابل أكبر بكثير منها في حالة خط النقل الهوائي حيث إن خط النقل يستخدم موصلات مكشوفة مثبتة على أبراج ويتم عزل الموصلات عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين ويكون الهواء هو العازل الأساسي بين الموصلات وبعضها حيث يتم تثبيت الموصلات بعيدة عن بعضها بمسافات تعتمد على مقدار الجهد، أما في الكابلات فيتم إحاطة الموصل بمادة عازلة عالية التكلفة ويلزم غطاء معدني لحماية العازل من تأثيرات التربة وحماية ميكانيكية للكيبل وفي بعض

أنواع الكابلات وخصوصا التي تستخدم الورق العازل يلزم ملء الكابل بالزيت العازل أو غاز خامل لملء الفراغات بين طبقات الورق وفي هذه الحالة يلزم تركيب خزانات للزيت أو الغاز الخامل على طول مسار الكابل مما يجعل تكلفة العزل أكبر بكثير للكيبل منها في حالة خط النقل.

تكلفة التركيب: تكلفة تركيب خطوط النقل الهوائية أقل بكثير من تكلفة تركيب الكابل.
وبصفة عامة فإن تكلفة الكابلات أعلى بكثير جدا من تكلفة الخطوط الهوائية حيث قد تصل أحيانا إلى عشرة أضعاف أو يزيد عن تكلفة خط النقل.

بالإضافة إلى هذه العوامل الاقتصادية فإن هناك عامل يحد من استخدام الكابلات لنقل القدرة عند جهود عالية لمسافات طويلة حيث إنه في حالة الكابل تكون السعة capacitance أكبر تأثيرا من المحاثة inductance ويكون تيار الشحن كبيراً جداً مما يسبب ارتفاعاً كبيراً في الجهد ولذلك فإنه لنقل كمية كبيرة من القدرة لمسافات طويلة على جهود عالية لا يمكن استخدام الكابلات وإنما تستخدم الخطوط الهوائية.

وكما سبق أن أوضحنا أن الكابلات تتميز على الخطوط الهوائية بأنها أكثر أمانا للأفراد وأقل عرضة للحوادث وأقل تأثرا بالكوارث الطبيعية والعوامل البيئية ولذلك فهي تستخدم عندما يكون الأمان مطلبا أساسيا أو عندما يكون النقل بخطوط هوائية غير مأمون كما في الحالات التالية:

- داخل المنشآت الصناعية وداخل المدن والمناطق المأهولة بالسكان
- في الأماكن التي قد تتسبب خطوط النقل الهوائية فيها في حدوث أعطال أو حوادث كما هي الحال بالقرب من المطارات
- عبر الموانع المائية المتسعة
- داخل محطات القدرة ومحطات المحولات

٣- ٢ : تركيب الكيبل :

تتكون جميع أنواع الكابلات بصفة أساسية من موصل ذي مقاومة منخفضة لنقل التيار الكهربائي ويسمى هذا الموصل عادة قلب الكابل (core) وعازل لعزل الموصلات عن بعضها وعما يحيط بها وعن الأرض، وفي بعض أنواع الكابلات- وخصوصا الكابلات المرنة التي تستخدم في التمديدات الكهربية- لا يحتوي الكابل أكثر من الموصل والعازل ولكن بصفة عامة كلما ارتفع الجهد الذي سيعمل عنده الكابل ازداد تركيبه تعقيدا. والمكونات الأخرى للكيبل تشمل:

- ستارة من مادة موصلة (screening) للحصول على توزيع أفضل للمجال الكهربائي داخل المادة العازلة
- مواد مالئة (حشو filler) وتستخدم لملء الفراغ بين القلوب في الكابلات متعددة القلوب
- غلاف معدني (metallic sheath) لمنع تسرب الرطوبة داخل الكابل وكذلك لاحتواء الغاز المضغوط أو الزيت العازل في الكابلات التي تستخدم مثل هذه الأوساط
- الدرع (armour) للحماية الميكانيكية للكيبل
- الغطاء الخارجي لحماية الأجزاء المعدنية من التآكل
- وقد تحتوي بعض أنواع الكابلات على أنابيب داخلية أو خارجية للتخلص من الحرارة المتولدة نتيجة لفقد القدرة في الكابل

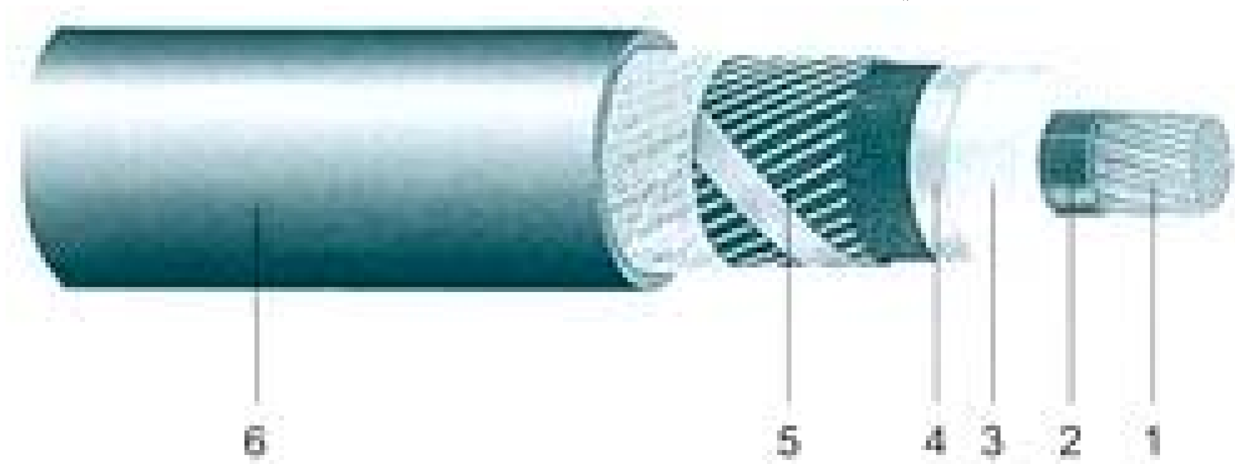
٣- ٣: أنواع الكابلات :

للكيابل أنواع عديدة ويمكن تصنيفها على أسس متعددة كعدد القلوب في الكابل الواحد ونوع المادة العازلة ومستوى الجهد الذي يعمل الكابل عنده وكذلك بالنسبة لمجال استخدامها. وفيما يلي سنستعرض أنواع الكابلات طبقا للتصنيفات المختلفة.

أولاً: بالنسبة لعدد القلوب في الكابل : يمكن تصنيف الكابلات إلى نوعين :

١. الكابل ذ، القلب الواحد single core cable
٢. الكابل متعدد القلوب multi-core cable

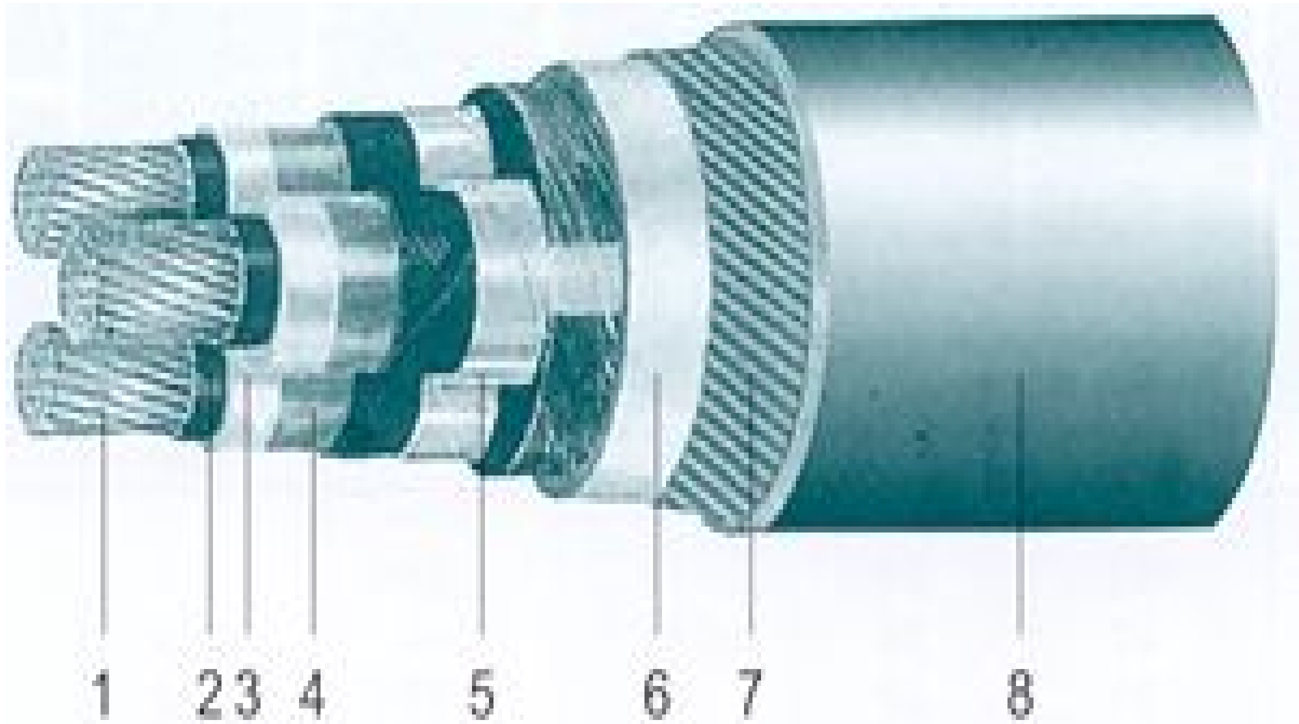
شكل (٣- ١) يبين كيبلاً ذا قلب واحد مشتملا على معظم المكونات التي من ممكن أن توجد في مثل هذا الكيبل، وهذه الأجزاء هي:



شكل (٣- ١) - كيبل ذو قلب واحد

١. موصل مجدول
٢. ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)
٣. العازل الرئيسي للكابل
٤. ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
٥. الغلاف المعدني : عبارة عن أسلاك نحاس ملفوفة بطريقة حلزونية حول الكابل ومن الممكن أن يكون شريط من الرصاص أو النحاس أو الألمنيوم
٦. الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

والشكل (٣- ٢) يوضح كيبلاً ذا ثلاثة قلوب وبه معظم المكونات الممكن تواجدها في الكيبل



شكل (٣- ٢) - كيبل ذو ثلاثة قلوب

وهذه الأجزاء هي:

١. موصل مجدول
٢. ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)
٣. عازل: العازل الرئيسي لموصلات الكابل وقد يكون من الورق المشبع بالزيت أو المطاط،أو البولي إيثيلين، أو البولي فينيل كلورايد وغيرها)
٤. ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
٥. ستارة العازل المعدنية : شريط نحاسي سمك ٠,١ مم
٦. التسليح: وهو في الكابل الموضح عبارة عن أسلاك من الصلب المجلفن ولكن قد يكون أيضا في صورة شريط من الصلب المجلفن وقد يكون أيضا من أسلاك الألمنيوم
٧. الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

وجدير بالذكر هنا أنه ليس من الضروري أن تكون جميع الكابلات لها نفس التركيب بل يختلف تركيب الكابل تبعا لمستوى الجهد الذي يعمل عنده ونوع العازل المستخدم في الكابل وطريقة تركيب الكابل واستخدامه.

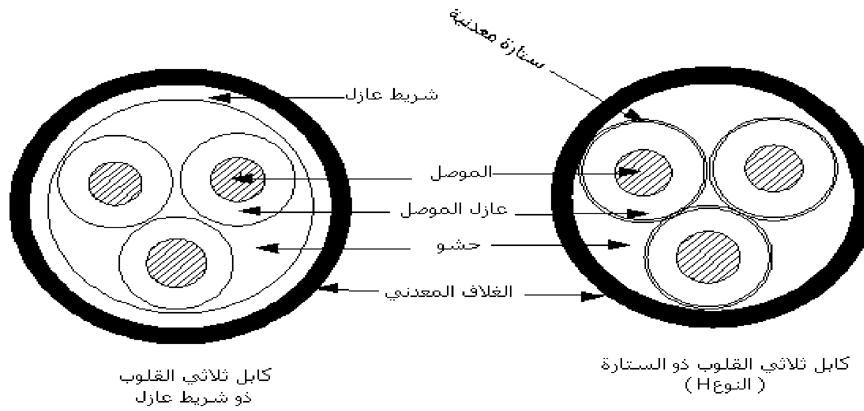
والمفاضلة بين كيابل القلب الواحد والكابلات عديدة القلوب يخضع لعوامل اقتصادية وتقنية كثيرة، فحين نجد أن الكابلات عديدة القلوب تكون أقل في التكلفة وتؤدي إلى استخدام اقتصادي أفضل لمجاري الكابلات فإن الكابل وحيد القلب يهيئ مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل ولذلك يفضل استخدام الكابلات وحيدة القلب داخل المباني نظرا لكثرة تعرض الكابل للانحناءات وكذلك كثرة عمل التفريعات والتوصيلات على الكابل.

ثانيا : بالنسبة لنوع المادة العازلة المستخدمة : يتم تصنيف الكابلات طبقا لنوع المادة العازلة إلى :

كيابل العازل الورقي Paper Insulated Cables : يتمتع العازل الورقي بخواص كهربائية جيدة ولكن عمليات اللحام وتوصيل النهايات لكابل العازل الورقي تحتاج إلى خبرة ودقة في الأداء أعلى من تلك المطلوبة للكيابل التي تستخدم الأنواع الأخرى من العوازل، ويوجد أنواع كثيرة من الكابلات ذات العازل الورقي منها:

كيابل العازل الورقي المصمت :

و هي التي لا تستخدم الزيت أو أي سائل أو غاز لمنع تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل ولذلك يكون استخدامها محدودا للجهود الأقل من ٦٦ ك.ف. وتصنع الكابلات المصمتة إما بقلب واحد أو بثلاثة قلوب. و الكابل ذو الثلاثة قلوب قد يكون من النوع ذي الشريط "belted cable"حيث يتم عزل كل من الموصلات الثلاثة بالورق المشبع ثم تلف الموصلات المعزولة معا بشريط ورقي عازل ويملأ الفراغ الناشئ بحشو من أية مادة عازلة ثم يحاط الكابل بغلاف معدني واحد ، ويستخدم الكابل ذو الشريط عند الجهود المنخفضة أما عند الجهود العالية يؤدي سوء توزيع المجال الكهربي داخل الكابل إلى انخفاض شدة الانهيار الكهربي للعازل، ولتحسين توزيع المجال الكهربي داخل الكابل يحاط العازل الخاص بكل موصل بستارة معدنية وتوصل الستارة المعدنية لكل موصل مع الغلاف المعدني للكيبل والذي يوصل بالأرض، ويعرف هذا النوع بالكيبل ذي الستارة أو الكابل من النوع H "H type cable" ويعتبر الكابل من النوع H من وجهة النظر الكهربية كما لو كان ثلاثة كابلات أحادية القلب منفصلة. شكل (٣- ٣) يبين كلا من الكابل ذي الشريط و الكابل من النوع H.



شكل(٣- ٣) الكابل ذو الشريط و الكابل من النوع H ذو الستارة

كابلات العازل الورقي المليئة بالزيت أو الغاز

تحت ضغط منخفض أو تحت ضغط مرتفع وفيها يستخدم الزيت العازل أو غاز النيتروجين الخامل للحد من تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل الورقي وكذلك للتبريد وتستخدم هذه الكابلات عند جهود تصل إلى ٧٥٠ ك.ف.، ولا تستخدم هذه الكابلات إلا حين تكون هناك ضرورة قصوى لاستخدامها وذلك لارتفاع تكلفتها وتعقيد التركيبات الخاصة بها وخصوصا التجهيزات اللازمة لسريان الزيت أو الغاز.

كابلات العوازل البوليمرية Polymer insulated cables

المادة العازلة في هذه الكابلات تكون إحدى المواد البوليمرية المستخرجة من صناعات البتروكيميائية وأكثر هذه المواد شيوعا في الاستعمال هي:

١. البولي فينيل كلورايد PVC:

ويتميز بخواص كهربائية ممتازة عند الجهود المنخفضة ودرجات الحرارة المنخفضة إلى جانب رخص الثمن مقارنة بالكيابل ذات العوازل الأخرى ولذلك تعتبر الكابلات المعزولة بمادة PVC هي الاختيار الأفضل في جميع أنحاء العالم حتى جهد ٣،٣ ك.ف إلا أنها غير مناسبة للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل.

٢. البولي إيثيلين التشابكي XLPE:

وتتميز بمقاومة عالية للرطوبة وتحمل درجات حرارة مرتفعة نسبيا أثناء التحميل العادي وكذلك عند زيادة الحمل أو في حالات القصر: والفقد في العزل أصغر مقارنة بمعظم مواد العزل الأخرى وهي أصلد العوازل المعروفة ولذا لا يحتاج إلى تسليح إلا عند توقع تعرضه لإجهادات ميكانيكية عنيفة ولذلك تستخدم في الجهود الأعلى من ٣،٣ك ف وحتى ٢٧٥ ك ف وهذه الكابلات شائعة الاستعمال في منظومات التوزيع. ولأن XLPE أصلد العوازل المعروفة فإنه يجب مراعاة ذلك عند تركيب الكابل حيث إنه يكون غير مناسب لعمل انحناءات.

٣. العوازل المطاطية:

وأهمها مطاط الإيثيلين بروبلين EPR ومطاط البيتيل PR وتستعمل عند الحاجة لخواص معينة متوفرة فيهما ، إلا أن الاتجاه العام هو تفضيل استخدام XLPE في الأحوال العادية

ثالثا: بالنسبة لمستوى الجهد : يتم تقسيم الكابلات إلى :

- كابلات الجهد العالي والفائق high voltage cables
- كابلات الجهد المتوسط medium voltage cables
- كابلات الجهد العالي والفائق low voltage cables

ولأنه لا توجد قيم محددة متفق عليها عالميا لحدود قيم الجهد لكل من هذه المستويات، فمثلا ما يعتبر جهدا متوسطا في المملكة يمكن اعتباره ضمن الجهد العالي في مكان آخر أو العكس، ولذلك يفضل تعريف الكابل بقيمة الجهد بين الموصل والأرض أثناء التشغيل (U_0) والجهد الذي تم تصميم الكابل عليه (U) وكل منهما يعطى بالقيمة الفعالة.

رابعا: أنواع الكابلات طبقا لاستخدامها :

١. كابلات نقل وتوزيع القوى الكهربية:

وهى الكابلات التي تستخدم في منظومات القوى الكهربية بمستوياتها المختلفة والكابلات التي تعمل عند الجهود العالية أكبر من ٤٠ ك.ف تعرف بكيابل النقل ويغلب استعمال الكابلات ذات العازل الورقي عند الجهود العالية وإن كانت كابلات XLPE بدأت تجد طريقها للاستعمال عند جهود تصل حتى ٢٧٥ ك ف، وتعمل كابلات التوزيع على جهود تتراوح بين ١١ك ف وحتى ٣٣ ك.ف .وكما ذكرنا سابقا أن الكابلات البوليمرية وخصوصا XLPE هي الأكثر شيوعا في شبكات التوزيع وفي المملكة حيث درجات الحرارة المرتفعة في معظم الأنحاء يكون لكيابل ميزة أخرى حيث إنها تتحمل درجات الحرارة العالية بالإضافة إلى سهولة تركيبها وتوصيلها وإصلاحها.

٢. كابلات التمديدات الكهربائية:

وتعرف أيضا بالكابلات المرنة حيث يكون الكابل مكونا من موصل مصنوع من النحاس الأحمر والعازل –الذي يكون غالبا من مادة PVC- لضمان مرونة الكابل حيث إنه يتعرض لكثير من الانحناءات ولسهولة تمديده داخل المواسير.

٣. الكابلات البحرية:

وتستخدم في نقل القدرة الكهربية عبر البحار ويتم تركيبها في قاع البحر أو المجرى المائي الذي تعبره.

٤. كابلات المنشآت الصناعية العامة:

وهي الكابلات المستخدمة لتغذية الطاقة داخل المنشآت الصناعية وتستخدم كابلات PVC بنجاح تام حتى جهد ٣,٣ك ف وبعض المنشآت تستخدم هذه الكابلات عند جهد ١١ ك ف وحتى ١٥ ك ف إلا أن الاتجاه السائد هو عدم استخدام كابلات لجهود أعلى من ٣,٣ ك ف نظرا لارتفاع السماحية له يزيد من الفقد في العازل ولذلك تستخدم كابلات XLPE , EPR للجهود ١١ك ف وأعلى.

٥. كابلات المصانع الكيميائية وصناعة البتروكيميائية:

الكابلات المستخدمة في مثل هذه الصناعات تكون عرضة لتسرب المواد العضوية التي لها القدرة على اختراق العازل والوصول إلى قلب الكابل مما يتسبب في حدوث الحرائق ولذلك يجب عمل الحماية اللازمة للكيبل باستعمال كابلات ذات غلاف أو كابلات عليها طبقة الحماية الخارجية المناسبة أوالطريقتين معا وذلك لمنع تسرب الزيوت والمواد الأخرى القابلة للاشتعال ووصولها إلى الكابل.

٣- ٤: حساب معاملات الكابل :

يتحدد أداء الكابل بمجموعة من العوامل التي يجب أن تحدد بدقة للحكم على ما إذا كان الكابل مناسبا للمهمة المزمع استخدامه لها أم لا ، وهذه العوامل تشمل مقدار الفقد في القدرة الحادث في الكابل، والهبوط في الجهد على الكابل، وتيار الشحن للكابل.

والفقد في القدرة يلزم حسابه ليس فقط للحكم على جودة أو كفاءة الكابل ولكن أيضا لتحديد السعة الأمبيرية له حيث إن هذا الفقد يتحول إلى حرارة تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته والتي يجب التأكد من أنها لن تتعدى الحدود المسموح بها حتى لا يتأثر العازل، ولحساب هذا الفقد يلزم حساب مقاومة الموصل وكذلك مقاومة العازل. و يلزم حساب الهبوط في الجهد على الكابل لتحديد ما إذا كان الجهد عند أطراف الحمل الذي يغذيه الكابل داخل نطاق الحدود المسموح بها لتنظيم الجهد أم لا ، و يتحدد الهبوط في الجهد بحاصل ضرب معاوقة الكابل والتيار المار فيه ولذا يلزم تحديد معاوقة الكابل بشقيها المقاومة والمفاعلة الحثية inductive reactance. ويتحدد تيار شحن الكابل بمقدار الجهد والسعة capacitance للكابل. و على هذا فإنه لحساب أداء الكابل يلزم حساب المعاملات الآتية له:

- مقاومة الموصل conductor resistance
- مقاومة العازل insulation resistance
- المحاثة inductance
- السعة capacitance

ومعظم هذه المعاملات يمكن الحصول عليها من النشرات الفنية التي تصدرها الشركات المنتجة للكيابل ولكن فيما يلي سنعرض الأساس العلمي لكيفية حساب هذه المعاملات وكيفية حساب أداء الكابل باستخدام هذه المعاملات ثم بعدها نوضح كيفية استخدام الجداول لحساب هذه المعاملات.

٣- ٤- ١: مقاومة الموصل :

يعتمد مقدار مقاومة الموصل (R) على نوع مادة الموصل – مُمَثلة بالمقاومة النوعية للمادة أو المقاومية ρ أوم.متر - ومساحة مقطعه (A متر٢) وطوله (ℓ متر) وتُحسب المقاومة باستخدام العلاقة المعروفة:

$$R = \frac{\rho.\ell}{A} \qquad (3.1)$$

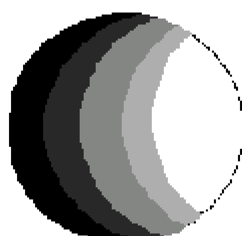
وتتغير مقاومية المادة بتغير درجة الحرارة ولذلك لا يكون كافيا تعريف مقاومية مادة ما دون تحديد لدرجة الحرارة التي قيست عندها هذه المقاومية ولذلك اصطلح على اعتبار درجة الحرارة ٢٠°م قيمة قياسية لتعريف مقاومة المواد المختلفة، وإذا أريد حساب المقاومة عند درجة حرارة أخرى - كما هو الحال في الكابلات حيث تعمل الكابلات عند درجات حرارة تتراوح من ٧٠°م إلى ٩٠°م- يجري تصحيح قيمة المقاومة باستخدام العلاقة التالية:

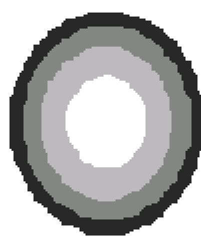
$$R_t = R_{20}(1+\alpha_{20}(t-20)) \qquad (3.2)$$

حيث R_t هي المقاومة عند درجة حرارة t و R_{20} هي المقاومة عند درجة ٢٠°م، α_{20} هو المعامل الحراري للمقاومة عند ٢٠°م. والجدول (١،٣) يوضح المقاومية والمعامل الحراري للمقاومة لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات.

جدول (٣- ١) الخواص الكهربية لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

المعدن	الموصلية النسبية (النحاس ١٠٠٪)	المقاومية عند ٢٠°م أوم.متر	المعامل الحراري للمقاومة عند ٢٠°م
النحاس المخمر	١٠٠	١،٧٢٤×١٠⁻٨	٠،٠٠٣٩
النحاس الصلد	٩٧	١،٧٧٧×١٠⁻٨	٠،٠٠٣٩
النحاس المقصدر	٩٥- ٩٩	(١،٧٤١- ١،٨١٤)×١٠⁻٨	٠،٠٠٣٩
الألمنيوم	٦١	٢،٨٠٣×١٠⁻٨	٠،٠٠٤٠
الصلب الطري	١٢	١٣،٨٠×١٠⁻٨	٠،٠٠٤٥
الرصاص	٨	٢١،٤× ١٠⁻٨	٠،٠٠٤٠





شكل(٣- ٤) - توزيع التيار في الموصل نتيجة للتأثير السطحي والتأثير التجاوري

وبالإضافة إلى زيادة مقاومة موصلات الكابلات نتيجة لارتفاع درجة الحرارة فهناك زيادة أخرى في مقاومة الكابلات المستخدمة في دوائر التيار المتردد نتيجة لظاهرتين هما ظاهرة التأثير السطحي و ظاهرة التأثير التجاوري، وشكل (٣- ٤) يوضح كيفية توزيع التيار على مقطع الموصل نتيجة لكل من التأثير السطحي والتأثير التجاوري. في هذا الشكل اللون الأسود يمثل أعلى كثافة للتيار واللون الأبيض يعنى أدنى كثافة و تتدرج كثافة التيار مع درجات الرمادي،وجدير بالإشارة هنا أن هذا الرسم للتوضيح فقط وما يحدث أن كثافة التيار تتغير تغييرا تدريجيا لا يمكن معه ملاحظة الفوارق بين المناطق المختلفة بالتحديد الموجود في الرسم.

وكما هو واضح من الشكل فإنه نتيجة للتأثير السطحي يتجه التيار إلى المرور في الحواف الخارجية للموصل تاركا المساحة القريبة من مركز الموصل مما يقلل من المساحة الفعلية للموصل، وكذلك نتيجة لتواجد موصلات الكابلات قريبة من بعضها سواء كانت موصلات داخل نفس الكابل أو موصلات كابلات مختلفة موضوعة في نفس المجري يتجه التيار في كل موصل للسريان في الجانب البعيد عن الموصل الآخر مما يقلل أيضا من المساحة الفعلية للموصل. وتأثير هذه العوامل يعطى في صورة جداول تحدد مقدار الزيادة في المقاومة عند الترددات المختلفة وفي مختلف أوضاع تركيب الكابلات وسوف نوضح استعمال هذه الجداول عند عرض حساب السعة الأمبيرية للكابل.

مثال ٣- ١

احسب مقاومة الموصل لكيبل تيار مستمر طوله 1.5 كيلومتر ومساحة مقطع موصله المصنوع من النحاس المخمر هي 185 مم^{٢}، إذا كانت درجة حرارة الموصل هي $90\ C^{\circ}$

الحـــــــــل

من الجدول (٣- ١) نجد أنه للنحاس المخمر $\rho_{20}=1.724*10^{-8}$ ohm. M و $\alpha_{20}=0.0039/^{\circ}c$

طول الكابل = 1.5 *1000 = 1500 متر

مساحة مقطع الموصل = 185 مم٢ = 185* 10^{-6} م٢

نحسب المقاومة عند 20 C° :

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}.\ell}{A} \quad = \frac{1.724*10^{-8}*1500}{185*10^{-6}}$$

$$= 0.13978\ \Omega$$

نحسب المقاومة عند 90 C°م :

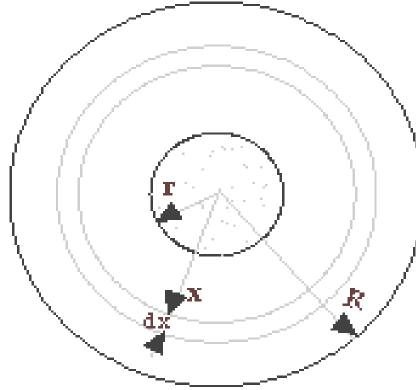
$$R_{90} = R_{20}(1+\alpha_{20}(90-20)) \quad = 0.13978\,(1+0.0039*70)$$

$$= 0.17794\,\Omega$$

٣- ٤- ٢ : سعة الكابل :

تنشأ السعة بصفة عامة بين أي موصلين يفصلهما عن بعضهما عازل وهذا هو الوضع داخل الكابل حيث الموصل والغلاف المعدني يفصلهما العازل والسعة في الكابل أكبر تأثيرا منها في أي من عناصر منظومة القوى الأخرى وأكبر وأوضح تأثيرا من محاثة الكابل، ولذا فهي من أهم المعاملات التي يجب حسابها للكابل. والسعة هي النسبة بين الشحنة والجهد ولذلك سنبدأ بفرض أن الشحنة على كل متر من طول الكابل تساوي q وباستخدام قوانين المجال الكهروستاتيكي نوجد قيمة الجهد V بدلالة q ومن ثم نحسب السعة.

والشكل (٣- ٥) يبين مقطعا في كيبل أحادي القلب حيث نصف قطر الموصل r ونصف القطر الداخلي للغلاف R. وإذا اعتبرنا نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل فإن وجود الشحنة q على الموصل ينشئ فيضا كهرئيا عند هذه النقطة كثافته D حيث:



شكل (٣-٥) مقطع في كابل وحيد القلب

$$D = \frac{q}{2\pi x} \qquad \text{coulomb/m}^2 \qquad (3.3)$$

وتكون شدة المجال الكهربي عند هذه النقطة:

$$E = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{q}{2\pi x \varepsilon} \qquad \text{Volt/m} \qquad (3.4)$$

ويمكن حساب فرق الجهد بين الموصل والغلاف المعدني كالآتي:

$$V = \int_R^r -E.dx = \int_R^r -\frac{q}{2\pi \varepsilon x}.dx = \frac{q}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{R}{r} \qquad \text{volts} \qquad (3.5)$$

وبذلك تكون السعة C هي:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{R}{r}} \qquad (3.6)$$

وبوضع $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r}{36\pi} \times 10^{-9}$ وعمل الاختصارات اللازمة ينتج أن:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \times 10^9 \times \ln\frac{R}{r}} \quad \text{F/m} \qquad (3.7)$$

حيث ε_r هو معامل السماحية النسبية لمادة العازل المستخدم في الكابل

٣- ٤- ٣: حساب شدة المجال الكهربي داخل الكابل :

المادة العازلة المستخدمة في صناعة الكابل لها كأي مادة عازلة أخرى قيمة قصوى لشدة المجال الكهربي التي يمكننا تحملها وتعرف هذه القيمة بالمتانة الكهربية للعازل ويجب أن لا تتعدى شدة المجال الكهربي داخل العازل هذه القيمة و إلا ينهار العازل مسببا قصر بين الموصل والغلاف المعدني للكابل، وفي الواقع يتم تصميم العازل بحيث تكون أكبر قيمة متوقعة لشدة المجال الكهربي فيه أقل بنسبة معقولة عن متانته الكهربية. وواضح أن المعادلة (٣,٤) تمثل العلاقة بين شدة المجال الكهربي داخل الكابل والشحنة على الموصل ولكن هذه المعادلة لا يتم استخدامها عمليا في حساب شدة المجال حيث إن الكابل يتم تصميمه على أساس جهد التشغيل الذي سيعمل عليه وليس على أساس الشحنة. ولذلك يلزم حساب شدة المجال الكهربي داخل الكابل بدلالة الجهد. وإذا عوضنا عن قيمة q ، نحصل على علاقة لحساب شدة المجال الكهربي عند أية نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل باستخدام جهد التشغيل للكابل U_o كالآتي:

$$E = \frac{U_o}{x.\ln\frac{R}{r}} \tag{3.8}$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن أكبر قيمة لشدة المجال الكهربي(E_{max}) تحدث عندما تكون x أقل ما يمكن أي عند سطح الموصل ($x = r$) وأقل قيمة لشدة المجال (E_{min}) تحدث عند السطح الداخلي للغلاف المعدني ($x = R$)، أي إن:

$$E_{max} = \frac{U_o}{r.\ln\frac{R}{r}} \quad , \qquad E_{min} = \frac{U_o}{R.\ln\frac{R}{r}} \tag{3.9}$$

٣- ٤- ٤ : حساب تيار الشحن للكابل :

تيار الشحن للكابل هو التيار الذي يمر في العازل نتيجة لسعة الكابل ويحدث هذا فقط عندما يعمل الكابل على جهد متردد ويكون هذا التيار متقدما عن الجهد بمقدار ٩٠° وفي حالة زيادة هذا التيار بنسبة كبيرة قد يسبب ارتفاعا كبيرا في الجهد يتسبب في تلف أو أخطاء في مكونات المنظومة المتصلة بالكيبل و يتم حساب تيار الشحن من العلاقة الآتية:

$$I_c=\omega CV \quad Amperes \qquad (3.10)$$

حيث $\omega = 2\pi f$

f هو التردد (في المملكة التردد 60 Hz)

مثال ٣- ٢ :

احسب السعة وتيار الشحن لكل كيلومتر لكيبل وحيد القلب إذا كان قطر الموصل 5 سم والقطر الداخلي للغلاف المعدني 15 سم و معامل السماحية النسبية للعازل $\varepsilon_r=3$ و الكابل يعمل عند جهد متردد 132 KV والتردد 60 هرتز ، احسب كذلك أقصى قيمة وأدنى قيمة لشدة المجال الكهربي داخل الكابل.

الحل:

R = 15÷2 = 7.5 cm , r = 5÷2 = 2.5 cm

سعة الكابل:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18\times10^9 * \ln\frac{R}{r}} = \frac{3}{18\times10^9 * \ln\frac{7.5}{2.5}} = 0.152*10^{-9} \quad F/m$$

$C = 0.152 * 10^{-6}$ F/km

تيار الشحن

$I_c = \omega CV = 2\pi f C V$

$= 2\pi * 60 * 0.152 * 10^{-6} * 132000$

$= 7.549$ Amper/km

عند حساب شدة المجال الكهربي تؤخذ القيمة العظمى للجهد وليست القيمة الفعالة

$$E_{max} = \frac{U_o}{r.\ln\frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{2.5\ln\frac{7.5}{2.5}} = 67.97\ \text{kV/cm},$$

$$E_{min} = \frac{U_o}{R.\ln\frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{7.5\ln\frac{7.5}{2.5}} = 22.66\ \text{kV/cm}$$

٣- ٥: الفقد في القدرة والسعة الأمبيرية :

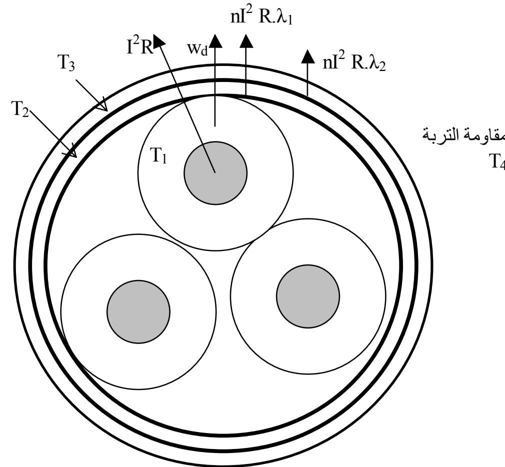
تتحدد السعة الأمبيرية للكابل بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكابل بصفة مستمرة. عندما يمر تيار كهربائي في الكابل فإن مقاومة الكابل تسبب فقدا في القدرة ، وبالإضافة إلى فقد القدرة الحادث في مقاومة موصل الكابل تحدث مفاقيد أخرى في كل من الغلاف المعدني نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة فيه وكذلك في العازل نفسه نتيجة لموصلية مادة العازل. وهذا الفقد في القدرة يتحول إلى طاقة حرارية تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته إلى درجة يحدث عندها اتزان حراري حيث يتساوى معدل توليد الحرارة الناتج عن الفقد في القدرة مع معدل تسرب هذه الحرارة من الكابل. ويتأثر الارتفاع في درجة حرارة الموصل – وبالتالي درجة الاتزان الحراري والسعة الأمبيرية للكابل- بالعوامل الآتية:

١. تيار الموصل I
٢. مقاومة الموصل R
٣. الفقد في العازل Wd : وهو يساوي $\omega C U_o^2 \tan(\delta)$ وات/متر، حيث (δ) هي زاوية الفقد لمادة العازل المستخدم في الكابل و $\tan(\delta)$ يساوي النسبة بين مقاومة العازل وسعة الكابل.
٤. المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة وبين سطح الكابل والوسط المحيط به، والمقاومة الحرارية لجسم هي النسبة بين الفارق في درجات الحرارة بين سطحي الجسم وكمية الحرارة المنتقلة بين هذين السطحين ووحداتها هي كلفن.متر/وات ($^oK.m/W$)، وتعتمد المقاومة الحرارية على تركيب الكابل وطريقة تمديده. وأهم المقاومات الحرارية للكابل هي:
   - المقاومة الحرارية بين الموصل والغلاف T_1
   - المقاومة الحرارية للبطانة بين الغلاف المعدني والتسليح T_2

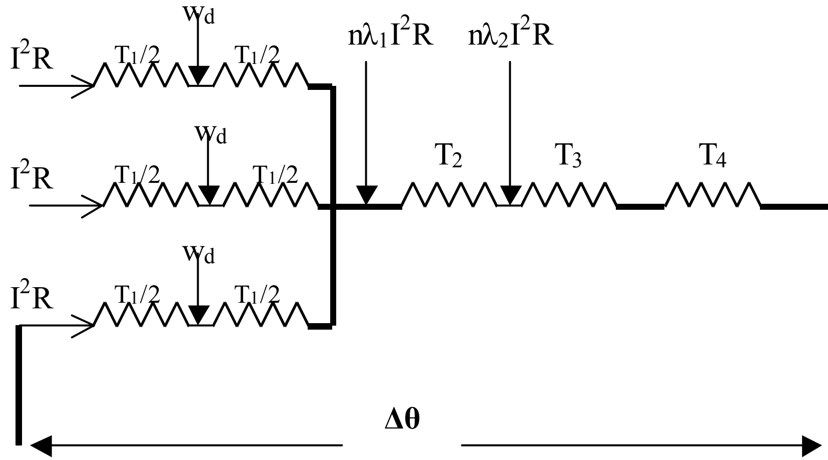
- المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي T_3
- المقاومة الحرارية بين السطح الخارجي للكابل والوسط المحيط T_4

٥. عدد الموصلات الحاملة للتيار في الكابل n
٦. النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكابل λ_1
٧. النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكابل λ_2

وشكل (٣- ٦) يوضح مصادر الفقد في القدرة في الكابل وكذلك المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة. في هذا الشكل تم تركيز الفقد في العازل في منتصف سمك العازل وذلك لأن هذا الفقد موزع بانتظام على مقطع العازل ويكون تركيز الفقد الكلي في منتصف سمك العازل مكافئا للتأثير الحراري الفقود ، ويمكن تمثيل سريان الحرارة من الكابل إلى الوسط المحيط بدائرة كهربية حيث تناظر درجة الحرارة الجهد في حين تكون الطاقة الحرارية السارية من الكابل إلى الوسط المحيط مناظرة للتيار كما في شكل (٣- ٧) .



شكل (٣- ٦) - الفقد في القدرة والمقاومات الحرارية في الكابل



شكل (٣- ٧) - الدائرة المكافئة للعلاقة بين الطاقة المفقودة في الكابل والارتفاع في درجة الحرارة

وبتطبيق قوانين الدوائر الكهربية على الدائرة في شكل (٣- ٧) يمكن حساب مقدار الارتفاع في درجة حرارة الموصل ($\Delta\theta$) كالآتي:

$$\Delta\theta = (I^2R + 0.5w_d).T_1 + (I^2R(1+\lambda_1) + w_d)nT_2 + (I^2R(1+\lambda_1+\lambda_2) + w_d)n(T_3+T_4)$$

ومنها يمكن حساب السعة الأمبيرية للكابل كالآتي:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - w_d[0.5T_1 + n(T_2+T_3+T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)} \right\}^{1/2}$$

وقيمة $\Delta\theta$ هنا هي الفرق بين درجة حرارة الكابل ودرجة حرارة الجو المحيط أي إن السعة الأمبيرية للكابل تعتمد أيضا على درجة حرارة الجو بمعنى أن نفس الكابل إذا استخدم في الباحة أو أبها مثلا تختلف عنها إذا استخدم في الرياض، وحتى نفس الكابل في نفس المكان تختلف قدرته على حمل التيار صيفا عنها في الشتاء. كما تعتمد السعة الأمبيرية للكابل على طريقة تمديده، فالسعة الأمبيرية للكابل الموضوع في الهواء تختلف عن السعة الأمبيرية لنظيره الموضوع في مجار أو مواسير أو المدفون في الأرض وتعتمد كذلك على نوعية التربة المدفون فيها الكابل. وتعتمد السعة الأمبيرية للكابل أيضا على ما إذا كانت هناك كابلات أخرى قريبة منه أم لا وعلى عدد الكابلات الموضوعة بالقرب منه حال وجودها. وعموما فإن حساب قيمة الارتفاع في درجة الحرارة وتحديد السعة الأمبيرية للكابل عملية شاقة

ولا تتم عادة إلا في مصانع الكابلات نفسها ، وتعطي مصانع الكابلات جداول بها السعة الأمبيرية أوقدرة حمل التيار للكابلات المختلفة عند ظروف تشغيل قياسية. ولأن ظروف التشغيل الواقعية تختلف عن الظروف القياسية فإنه يتم تزويد هذه الجداول بملاحق خاصة لتصحيح السعة الأمبيرية تبعا للظروف الواقعية وذلك بضرب القيمة المناظرة للحالة القياسية في معامل التقنين المناظر للظروف الواقعية التي يعمل عندها الكابل. وفيما يلي سنتعرف على كيفية استعمال هذه الجداول في تحديد السعة الأمبيرية للكابل.

٣- ٦ : استخدام الجداول لحساب السعة الأمبيرية للكابلات :

كما ذكرنا سابقا فإن مصانع الكابلات تعطي جداول بالسعة الأمبيرية للكابلات في ظروف قياسية معرفة بالمواصفات القياسية العالمية للكيابل في مختلف أوضاع تركيبها كما يلي:

٣- ٦- ١: الكابلات الموضوعة في الهواء :

الظروف القياسية للكابلات الموضوعة في الهواء

١. درجة حرارة الجو المحيط ٢٥° مئوية لكابلات التوزيع والنقل و ٣٠° مئوية للكابلات داخل المباني
٢. أقل مسافة بين الكابل والحائط هي ٢٠ مم
٣. المسافة بين أقرب كابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٥٠ سم
٤. الكابل معزول عن ضوء الشمس المباشر

والجدول (٣- ٢) يعطي معاملات التقنين للتصحيح من ٢٥° مئوية إلى درجات الحرارة الأخرى لأنواع مختلفة من الكابلات.

جدول (٣- ٢) معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الهواء المحيط °م						
		٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥	٥٠	٥٥
ورق	٦٥	١	٠,٩٣	٠,٨٥	٠,٧٧	٠,٦٨	٠,٥٨	٠,٤٧
ورق	٨٠	١	٠,٩٤	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٢	٠,٦٥
PVC	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٤	٠,٥٥
XLPE	٩٠	١	٠,٩٥	٠,٩١	٠,٨٦	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩

وسنوضح كيفية تحديد السعة الأمبيرية لكيبل XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت في ظروف مختلفة باستخدام السعة الأمبيرية له في الظروف القياسية ومعاملات التقنين الموضحة بجدول (٣- ٢) .

مثال ٣- ٣ :

احسب السعة الأمبيرية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت ذات موصل نحاس واحد مساحة مقطعها ١٨٥ مم^{2} و مرتبة في وضع مسطح في الهواء الجوي إذا كانت درجة حرارة الجو ٤٠ °م

الحل:

من جدول (٣- ٣) نجد أن السعة الأمبيرية للكابل XLPE وحيد القلب المرتب في وضع مسطح ومساحة مقطعه ١٨٥ مم^2 هي ٦٠٠ أمبير (القيمة المظللة بالجدول)، وهذه القيمة تمثل السعة الأمبيرية للكابل عندما تكون درجة حرارة الجو ٢٥ $^\circ$م.

ولتصحيح السعة الأمبيرية للكابل، نوجد معامل التقنين من جدول (٣- ٢) للكابل XLPE عند ٤٠ $^\circ$م.

معامل التقنين = ٠,٨٦

السعة الأمبيرية عند ٤٠ $^\circ$م = السعة الأمبيرية عند ٤٠ $^\circ$م × معامل التقنين

= ٦٠٠ × ٠,٨٦

= ٥١٦ أمبير

جدول (٣- ٣) السعة الأمبيرية لكابلات XLPE ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل مم٢	في الهواء				في الأرض			
	قلب واحد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب	قلب واحد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب
	مثلثي*	مسطح†			مثلثي	مسطح		
موصلات النحاس								
١٦			١٢٠	١٠٥			١٤٠	١١٥
٢٥			١٦٠	١٤٠			١٨٠	١٥٠
٣٥			٢٠٠	١٧٠			٢١٥	١٨٠
٥٠	٢٣٥	٢٧٥	٢٤٠	٢٠٥	٢٣٥	٢٤٥	٢٥٥	٢١٥
٧٠	٣٠٠	٣٤٥	٣٠٠	٢٦٠	٢٩٠	٣٠٠	٣١٥	٢٦٥
٩٥	٣٦٥	٤٢٠	٣٧٥	٣٢٠	٣٤٥	٣٥٥	٣٨٠	٣١٥
١٢٠	٤٢٥	٤٨٥	٤٣٠	٣٧٠	٣٩٠	٤٠٠	٤٣٠	٣٦٠
١٥٠	٤٨٥	٥٤٠	٤٩٠	٤٣٠	٤٣٥	٤٤٠	٤٨٠	٤٠٥
١٨٥	٥٦٠	٦٠٠	٥٧٠	٤٩٠	٤٩٠	٤٨٥	٥٤٠	٤٦٠
٢٤٠	٦٦٠	٧٠٠	٦٧٠	٥٨٠	٥٦٠	٥٥٠	٦٣٠	٥٣٠
٣٠٠	٧٥٠	٧٨٠	٧٧٠	٦٦٠	٦٣٠	٦١٠	٧٠٠	٥٩٠
٤٠٠	٨٦٠	٨٤٠			٧٠٠	٦٤٠		
٥٠٠	٩٦٠	٩١٠			٧٧٠	٦٩٠		
٦٣٠	١٠٨٠	٩٨٠			٨٤٠	٧٤٠		
موصلات الألمنيوم								
١٦			٨٩	٧٧			١٠٥	٨٩
٢٥			١٢٠	١٠٥			١٣٥	١١٥
٣٥			١٤٥	١٢٥			١٦٥	١٣٥
٥٠	١٧٠	٢٠٠	١٧٥	١٥٥	١٧٥	١٨٥	١٩٥	١٦٥
٧٠	٢١٥	٢٥٥	٢٢٠	١٩٥	٢٢٠	٢٣٠	٢٤٠	٢٠٠
٩٥	٢٦٥	٣١٥	٢٧٠	٢٣٥	٢٦٠	٢٧٠	٢٨٥	٢٤٠
١٢٠	٣١٠	٣٦٥		٢٨٠	٢٩٥	٣١٠		٢٧٥
١٥٠	٣٥٥	٤١٥		٣٢٠	٣٣٠	٣٤٥		٣١٠
١٨٥	٤١٠	٤٧٥		٣٧٠	٣٧٥	٣٩٠		٣٥٠
٢٤٠	٤٩٥	٥٥٠		٤٤٠	٤٣٥	٤٤٥		٤١٠

٣٠٠	٥٧٠	٦٣٠		٥٧٠	٤٩٠	٤٩٥		٤٦٠

* مثلثي : ترتيب الكابلات على الشكل

† مسطح : ترتيب الكابلات على الشكل

٣- ٦- ٢: الكابلات المدفونة مباشرة في الأرض :

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥° مئوية
٢. المقاومية الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات ١ك ف، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وأي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، ولهذا الغرض توجد جداول لمعاملات التقنين لأي تغيير في أي من هذه الظروف، والجداول التالية (٣- ٤) إلى (٣- ٧) تعطي معاملات التقنين للحالات المختلفة.

جدول (٣- ٤) معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل ° م	درجة حرارة الأرض ° م						
		١٠	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥
ورق	٦٥	١,٠٥	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧١	٠,٦٣
ورق	٧٥	١,٠٤	٠,٩٦	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٨٣	٠,٧٨	٠,٧٣
PVC	٧٠	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤	٠,٦٧
XLPE	٩٠	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١	٠,٧٧

جدول (٣- ٥) معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

حجم الموصل(مم٢)	المقاومية الحرارية للتربة K.m/W						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩١	٠,٨١	٠,٧٣	٠,٦٧
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٧	١,١٢	١,٠٧	٠,٩٠	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٦
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٨	١,١٣	١,٠٨	٠,٩٠	٠,٧٩	٠,٧١	٠,٦٥
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٤
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,١٤	١,١٠	١,٠٧	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٦	٠,٧٠
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩٢	٠,٨٢	٠,٧٤	٠,٦٨

جدول ٣- ٦ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الكابلات في المجموعة	المسافة بين مراكز الكابلات (متر)				
		تلامس	٠,١٥	٠,٣٠	٠,٤٥	٠,٦٠
١ /٠,٦	٢	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٩٠
	٤	٠,٦٣	٠,٧٤	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٨٩
	٥	٠,٥٩	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٨٧
	٦	٠,٥٥	٠,٦٧	٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٦
١,٩/ ٣,٣ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩٠	٠,٩٢
	٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٦
	٤	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٤
	٥	٠,٥٩	٠,٦٦	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨١
	٦	٠,٥٥	٠,٦٣	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
٣٣/١٩	٢	٠,٨٠	٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩١
	٣	٠,٧٠	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٤	٠,٦٤	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨	٠,٨٢
	٥	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٧٩
	٦	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨

والآن لبيان كيفية استعمال هذه الجداول لتحديد السعة الأمبيرية للكابل تبعا لظروف التركيب الخاصة به سنورد بعض الأمثلة .

مثال ٣- ٤ :

أربعة كابلات XLPE جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت ذات ٣ قلوب نحاسية مساحة مقطع كل منها ٣٠٠مم^{2} مدفونة في الأرض على عمق ١,٥ متر، فإذا كانت المسافة بين مركز أي كابل ومركز الكابل المجاور له ٤٥ سم و درجة حرارة الأرض ٢٥^{o} م و المقاومية الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات. احسب السعة الأمبيرية للكابل.

الحل:

أولا : نوجد السعة الأمبيرية للكابل في الظروف القياسية

من جدول (٣- ٣) لكابل نحاسي ذي ٣ قلوب ومساحة مقطعه ٣٠٠مم^{2} نجد أن السعة الأمبيرية هي ٥٩٠ أمبير (القيمة التي تحتها خط في جدول ٣- ٣)

ثانيا : نقارن الظروف الفعلية للكابل بالظروف القياسية فإذا كانت متماثلة يكون معامل التقنين =١ وإلا نوجد معامل التقنين للظروف المختلفة عن الظروف القياسية

١. درجة حرارة الأرض ٢٥^{o} م وهي مختلفة عن درجة الحرارة القياسية ١٥^{o} م، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض، من جدول ٣- ٤ نجد أنه للكابل XLPE عند ٢٥^{o} م يكون:

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = ٠,٩٣

٢. المقاومية الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات وهي مختلفة عن القيمة القياسية ١,٢ كلفن.متر/وات ، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لمقاومية التربة، من جدول ٣- ٥ نجد أنه للكابل متعدد القلوب والذي تقع مساحة مقطعه بين ١٨٥ و ٤٠٠ مم^{2} (مساحة مقطع الكابل ٣٠٠ مم^{2} تقع داخل هذا النطاق) عند مقاومية حرارية للتربة مقدارها ٢,٥ كلفن.متر/وات يكون:

معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = ٠,٧٤

٣. المسافة بين الكيبلين ٤٥ سم وهي أقل من القيمة القياسية ١٨٠ سم، وبالتالي يلزم إيجاد معامل التقنين التجميعي، من جدول ٣- ٦ نجد أنه لأربعة كابلات جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت مدفونة في وضع مسطح على بعد ٤٥ سم من بعضها يكون:

معامل التقنين التجميعى = ٠,٨٦

٤. عمق الدفن ١,٥ متر وهو أكبر من القيمة القياسية (٥٠ سم للكابلات جهد ١ ك ف)، ولذلك يلزم حساب معامل التقنين لعمق الدفن، ومن الجدول ٣- ٧ نجد أنه لكابل ٠,٦/١ ك ف مساحة مقطعه ٣٠٠ مم٢ مدفون على عمق ١,٥ متر يكون:

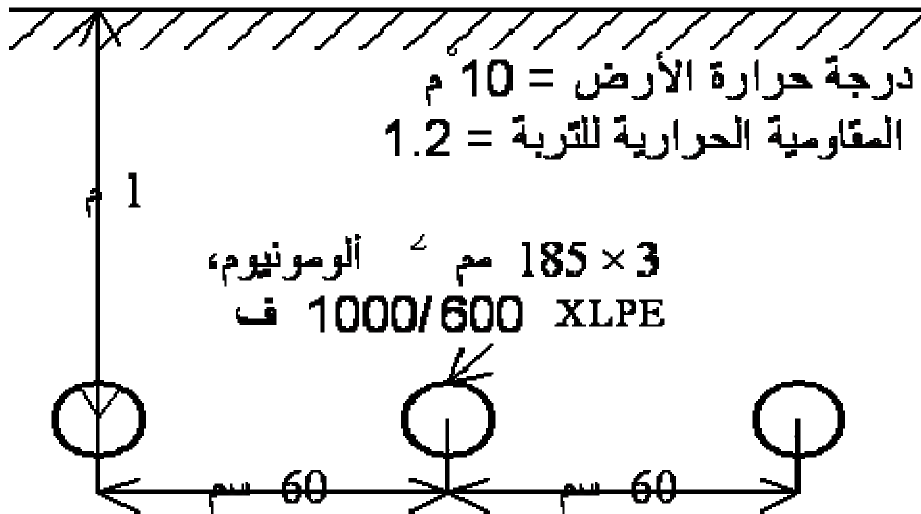
معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩١

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = السعة الأمبيرية في الظروف القياسية × معامل التقنينة لدرجة حرارة الأرض × معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة × معامل التقنين التجميعي × معامل التقنين لعمق الدفن

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = ٥٩٠ × ٠,٩٣ × ٠,٧٤ × ٠,٨٦ × ٠,٩١ = ٣١٧,٧٧ أمبير

مثال ٣- ٥ :

احسب السعة الأمبيرية لنظام الكابلات الموضح بالشكل



من جدول ٣- ٣ السعة الأمبيرية في الظروف القياسية لكابل XLPE ألنيوم ذي ٣ قلوب ومساحة مقطع ١٨٥ مم² = ٣٥٠ أمبير

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = ١,٠٣ (جدول ٣- ٤ ، كابل XLPE ودرجة حرارة ١٠ °م)

معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = ١ (المقاومية الحرارية للتربة هنا تساوي القيمة القياسية)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٩٠ (جدول ٣- ٦ عند جهد ١/٠,٦ ك ف ، عدد كابلات ٣ ، مسافة ٦٠ سم)

معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩٤ (جدول ٣- ٧ عند عمق ١م، جهد ١/٠,٦ ك ف، مساحة مقطع٧٠- ٣٠٠ مم²)

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = ٣٥٠ × ١,٠٣ × ١ × ٠,٩ × ٠,٩٤ = ٣٠٥ أمبير

جدول (٣- ٧) معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكابل)

عمق الدفن	١/٠,٦ ك ف			١,٩/ ٣,٣ حتى١٩/٣٣ ك ف	
(متر)	حتى ٥٠ مم٢	من ٧٠ إلى ٣٠٠ مم٢	أعلى من ٣٠٠ مم٢	حتى ٣٠٠ مم٢	أعلى من ٣٠٠ مم٢
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	- -	- -
٠,٦٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	- -	- -
٠,٨٠	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٤	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٨	٠,٩٧
١,٢٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٠	٠,٩٦	٠,٩٥
١,٥٠	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٩	٠,٩٥	٠,٩٤
١,٧٥	٠,٩٢	٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٩٤	٠,٩٢
٢,٠٠	٠,٩١	٠,٨٨	٠,٨٦	٠,٩٢	٠,٩٠
٢,٥٠	٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٥	٠,٩١	٠,٨٩
٣أو أكثر	٠,٨٩	٠,٨٦	٠,٨٣	٠,٩٠	٠,٨٨

٣- ٦- ٣ : الكابلات الموضوعة في مجارٍ :

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥° مئوية
٢. المقاومية الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات ١ك ف، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وكما في الحالات السابقة أي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، وبالنسبة لمعاملات التقتين لدرجة حرارة الأرض هي نفسها كما في حالة الكابلات المدفونة مباشرة في التربة أما باقي معاملات التقنين لباقي الظروف فهي موضحة بالجداول (٣- ٨) إلى (٣- ١٠) . وخطوات تحديد السعة الأمبيرية للكابلات في هذه الحالة هي نفس الخطوات المتبعة في الحالات السابقة.

جدول (٣- ٨) معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة للكابلات الموضوعة في مجارٍ

حجم الموصل(مم^2)	المقاومية الحرارية للتربة K.m/W						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١٠	١,٠٧	١,٠٤	٠,٩٤	٠,٨٧	٠,٨١	٠,٧٥
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١١	١,٠٨	١,٠٥	٠,٩٤	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٣
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٣	١,٠٩	١,٠٦	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٠
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٥	١,٠٤	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٢	٠,٨٧	٠,٨٣
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,٠٧	١,٠٥	١,٠٣	٠,٩٦	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٧٨
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٧	٠,٨٢	٠,٧٦

مثال ٣- ٦:

منشأة صناعية تحتاج إلى كابلات XLPE بمقنن جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت لتغذية حمل مقداره ١٥٠٠ أمبير لكل وجه. اقتضت ظروف التشغيل استعمال ٦ كابلات ثلاثية القلوب داخل مجارٍ يفصل بينها مسافات ٤٥ سم (بين مراكز المجاري المتجاورة) والمجاري كلها مدفونة في وضع أفقي مسطح على عمق ١,٢٥ متر. فإذا كانت المقاومية الحرارية للتربة ١ كلفن.متر/وات ودرجة حرارتها ٣٠° م. اختر الكابل المناسب لحمل هذا التيار في هذه الظروف.

الحل:

خلافا لكل الأمثلة السابقة فالمعلوم هنا هو السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية، وحيث إن جداول الكابلات تعطي السعة الأمبيرية في الظروف القياسية فإنه لاختيار الكابل المناسب يلزم تحديد السعة الأمبيرية القياسية المطلوبة.

السعة الأمبيرية للكابل الواحد في ظروف التشغيل الطبيعية = ١٥٠٠÷ ٦ = ٢٥٠ أمبير

معاملات التقنين لهذه الحالة كما يلي:

معامل تقنين درجة حرارة الأرض = ٠,٨٩ (جدول ٣- ٤ لكابل XLPE عند ٣٠° م)

معامل تقنين المقاومية الحرارية للتربة = ١,٠٣ (جدول ٣- ٨ لكابل ذي قلوب عديدة بمساحة مقطع من٢٥ إلى ١٥٠مم^{٢} كما هو متوقع تبعا لقيمة التيار)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٨٦ (جدول ٣- ١٠ لكابل جهد ١/٠,٦ ك ف وعدد ٦ مجارٍ ومسافة ٤٥ سم بين مركز المجاري)

معامل تقنين عمق الدفن = ٠,٩٥ (جدول ٣- ٩ لكابل عديد القلوب جهد ١/٠,٦ ك ف داخل مجارٍ على عمق ١,٢٥ متر)

معامل التقنين الكلي = حاصل ضرب معاملات التقنين الأربعة

= ٠,٨٩ × ١,٠٣ × ٠,٨٦ × ٠,٩٥ = ٠,٧٤٨٩٤٣٩

السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية = السعة الأمبيرية القياسية × معامل التقنين الكلي

٢٥٠ = السعة الأمبيرية القياسية × ٠,٧٤٨٩٤٣٩

السعة الأمبيرية في الظروف القياسية = ٢٥٠ ÷ ٠,٧٤٨٩٤٣٩ = ٣٣٣,٨ أمبير

وبالبحث في جدول (٣- ٣) عن كابل عديد القلوب سعته الأمبيرية مساوية أو قريبة من ٣٣٣,٨ أمبير نجد أن أقرب كيبلين لهذه السعة هما:

- الكابل ذو مساحة مقطع ٩٥ مم^{٢} سعته الأمبيرية ٣١٠ أمبير
- الكابل ذو مساحة مقطع ١٢٠ مم^{٢} سعته الأمبيرية ٣٦٠ أمبير

ولذا نختار الكابل الذي مساحة مقطعه ١٢٠ مم^{٢} حتى يكون أكثر أمانا.

جدول (٣- ٩) معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجرى)

عمق الدفن (متر)	١/٠,٦ ك ف		١,٩/ ٣,٣ حتى١٩/٣٣ ك ف	
	قلب واحد	عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	- -	- -
٠,٦٠	٠,٩٨	٠,٩٩	- -	- -
٠,٨٠	٠,٩٥	٠,٩٧	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٣	٠,٩٦	٠,٩٨	٠,٩٩
١,٢٥	٠,٩٠	٠,٩٥	٠,٩٥	٠,٩٧
١,٥٠	٠,٨٩	٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩٦
١,٧٥	٠,٨٨	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٥
٢,٠٠	٠,٨٧	٠,٩٣	٠,٩٠	٠,٩٤
٢,٥٠	٠,٨٦	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٩٣
٣أو أكثر	٠,٨٥	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٩٢

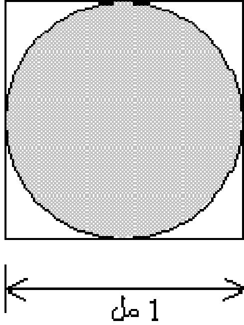
جدول (٣- ١٠) معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب
داخل مجار في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد المجاري في المجموعة	المسافة بين مراكز المجاري (متر)			
		تلامس	٠,٣٠	٠,٤٥	٠,٦٠
١ / ٠,٦	٢	٠,٩٠	٠,٩٣	٠,٩٥	٠,٩٦
	٣	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠	٠,٩٣
	٤	٠,٧٨	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩١
	٥	٠,٧٥	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠
	٦	٠,٧٢	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٩٠
١,٩/ ٣,٣ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨٨	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٨٩
	٤	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٤	٠,٨٧
	٥	٠,٧١	٠,٧٧	٠,٨٢	٠,٨٥
	٦	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤
٣٣/١٩	٢	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩٢	٠,٩٣
	٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥	٠,٨٧
	٤	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٥	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٧٩	٠,٨٣
	٦	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢

٣- ٧ : مقياس السلك :

إنه من غير العملي تصنيع كابلات أو حتى أسلاك مكشوفة بأية مساحة مقطع ولكن يتم تصنيع الأسلاك والكابلات بأحجام قياسية ومساحات مقطع محددة (انظر الجداول السابقة). وعموما فإن مساحة الموصل أو السلك يمكن التعبير عنها بعدة طرق:

الأولى: بالملي متر المربع كما هو معطى في جميع الجداول السابقة



الثانية: بالمل الدائري circular mil أو المل المربع square mil. المل الدائري هو مساحة دائرة قطرها يساوي ١ مل و ١ مل = ٠,٠٠١ بوصة = ٠,٠٢٥٤ مم ، والمل المربع عبارة عن مساحة مربع طول ضلعه ١ مل. والعلاقة بين المل الدائري (c.mil) والمل المربع (sq.mil) يمثلها الشكل المقابل حيث تمثل نسبة مساحة الدائرة المظللة إلى مساحة المربع نفس نسبة المل الدائري إلى المل المربع

وعموما فإن:

$$1\ \text{c.mil} = 0.7854\ \text{sq.mil} = 0.7854*10^{-6}\ \text{in}^2 = 506.71*10^{-6}\ \text{mm}^2$$

الثالثة : وهي الأكثر شيوعا واستعمالا وهي استخدام مقياس السلك wire guage و مقياس السلك هو عبارة عن رقم صحيح يعطي فكرة عن حجم السلك وأشهر مقياس سلك مستخدم هو مقياس السلك الأمريكي American Wire Guage (AWG) وهذا الرقم يتراوح من (4/0) 0000 وحتى 0.12 والجدير بالذكر هنا أنه كلما كبر مقياس السلك صغرت مساحته أي إن أكبر مساحة هي للسلك الذي يكون مقياسه 0000 (تكتب أيضا 4/0) وأصغر مساحة مقطع هي للسلك الذي مقياسه 0.12 وهناك علاقة تربط بين مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري ورقم المقياس لنفس السلك، وهذه العلاقة هي كالآتي:

$$\mathbf{a,\ (c\,mil) = \frac{105500}{1.261^{n}}}$$

حيث (a) هي مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري، (n) هو رقم مقياس السلك مع مراعاة أنه لأرقام المقياس 0000,000,00,0 فإن قيم n المناظرة هي 0,(1-),(2-),(3-) على الترتيب.

٣- ٨. فقد الفولطية

عند مرور التيار في موصلات الكابل يحدث هبوط في الجهد – فقد الفولطية - بين طرفي الموصل، وهذا الفقد في الجهد يساوي حاصل ضرب التيار ومعاوقة الكابل. إذا كان فقد الفولطية هذا كبيرا فإنه يتسبب في انخفاض الجهد الواصل للمعدات و الأجهزة بطريقة لا تناسب الأداء السليم لهذه المعدات والأجهزة. وفقد الفولطية يكون ذا أهمية كبرى ويجب أن يولى عناية خاصة في دوائر الجهد

المنخفض عنها في دوائر الجهد المتوسط والجهد العالي، وعموما فإن فقد الفولطية في دوائر الجهد الأعلى من ١٠٠٠ فولت لا يمثل نسبة تذكر إلا عندما تكون مسارات الكابل طويلا جدا. وعادة ما تعطى قيم فقد الفولطية في جداول خصائص الكابلات بالملي فولت/أمبير/متر (mV/A/m) أي مقدار فقد الفولطية مقدرا بالملي فولت لكل متر من طول الكابل لكل ١ أمبير من التيار المار في موصل الكابل، وفي حالة عدم إعطاء هذه القيم يتم استنتاجها من العلاقات الآتية:

لدوائر الوجه الواحد يكون: $mV / A / m = 2Z$

لدوائر الأوجة الثلاثة يكون: $mV / A / m = \sqrt{3}\, Z$

حيث Z هي معاوقة موصل الكابل مقدرة بالأوم/كيلومتر (Ω/km)

جدول (٣- ١١) يوضح قيم هبوط الجهد لعدد من كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت عند تردد ٥٠ هرتز – التردد في المملكة ٦٠ هرتز - ولكن على أي الأحوال سيفي هذا الجدول بغرض إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية باستخدام الجدول. أما جدول (٣- ١٢) فيعطي الخواص الكهربية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت – تم تعديل قيم المفاعلة بالجدول من تردد ٥٠ هرتز إلى تردد ٦٠ هرتز وسوف نستخدم هذا الجدول في إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية في حالة عدم توافر الجداول الخاصة بها. وسوف نوضح أيضا كيفية حساب فقد القدرة في موصل الكابل باستخدام نفس الجدول.

جدول (٣- ١١) فقد الفولطية (mV/m/A) لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل (مم^٢)	نحاس				ألمنيوم			
	قلب وحيد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب	قلب وحيد		قلبان	٣ أو ٤ قلوب
	مثلثي	مسطح			مثلثي	مسطح		
٥٠	٠,٨٦	٠,٨٧	١,٠٠	٠,٨٧	١,٤٠	١,٥٠	١,٧٠	١,٤٠
٧٠	٠,٦٢	٠,٦٥	٠,٧٠	٠,٦١	٠,٩٨	١,٠٠	١,٢٠	٠,٩٩
٩٥	٠,٤٦	٠,٥٢	٠,٥٢	٠,٤٥	٠,٧٢	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٧٢
١٢٠	٠,٣٧	٠,٤٥	٠,٤٢	٠,٣٦	٠,٥٨	٠,٦٥		٠,٥٨
١٥٠	٠,٣٢	٠,٤١	٠,٣٥	٠,٣٠	٠,٤٨	٠,٥٦		٠,٤٨

مثال :

احسب مستعينا بجدول (٣- ١١) فقد الفولطية في كابلات XLPE جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت الآتية:

١. كابل ٣ *٩٥ مم٢ نحاس طوله ٥٠ متر ويحمل تياراً مقداره ٢٠٠ أمبير
٢. كابل ٢ *٧٠ مم٢ ألمنيوم طوله ١٠٠ متر ويحمل تياراً مقداره ١٥٠ أمبير
٣. كابل ١ *١٢٠ مم٢ نحاس مستخدم في دائرة ثلاثية الطور ومرتب في وضع تلامس مثلثي مع الكيبلين الآخرين طوله ٤٥ متر ويحمل تيار ٣٠٠ أمبير

الحل:

١. للكابل الأول نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٤٥ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٤٥ × ٥٠ × ٢٠٠ = ٤٥٠٠ ملي فولت = ٤,٥ فولت
٢. للكابل الثاني نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ١,٢ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ١,٢× ١٠٠ × ١٥٠ = ١٨٠٠٠ ملي فولت = ١٨ فولت
٣. للكابل الثالث نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٣٧ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٣٧ × ٤٥ × ٣٠٠ = ٤٩٩٥ ملي فولت = ٤,٩٩٥ فولت

جدول (٣- ١٢) الخواص الكهربية لكابلات XLPE جهد ٦٠٠/١٠٠٠ فولت

مساحة مقطع الموصل (مم٢)	كابل ذو قلب واحد				كابل متعدد القلوب		
	مقاومة التيار المتردد عند ٩٠° م (Ω/km)		المفاعلة عند ٦٠ هرتز (Ω/km)		مقاومة التيار المتردد عند ٩٠° م(Ω/km)		المفاعلة عند ٦٠ هرتز (Ω/km)
	نحاس	ألومونيوم	مثلثي	مسطح	نحاس	ألومونيوم	
١٦					١,٤٧٠	٢,٤٢٠	٠,٠٩٦
٢٥					٠,٩٢٧	١,٥٤٠	٠,٠٩٥
٣٥					٠,٦٦٨	١,١١٠	٠,٠٩٢
٥٠	٠,٤٩٤	٠,٨٢٢	٠,١٢٧	٠,١٧٤	٠,٤٩٤	٠,٨٢٢	٠,٠٩١
٧٠	٠,٣٤٢	٠,٥٦٨	٠,١٢٤	٠,١٩٤	٠,٣٤٢	٠,٥٦٨	٠,٠٩٠
٩٥	٠,٢٤٧	٠,٤١١	٠,١١٨	٠,١٨٨	٠,٢٤٧	٠,٤١١	٠,٠٨٨
١٢٠	٠,١٩٧	٠,٣٢٥	٠,١١٥	٠,١٨٦	٠,١٩٧	٠,٣٢٥	٠,٠٨٨
١٥٠	٠,١٦٠	٠,٢٦٥	٠,١١٦	٠,١٨٧	٠,١٦٠	٠,٢٦٥	٠,٠٨٨

١٨٥	٠,١٢٨	٠,٢١١	٠,١١٥	٠,١٨٦	٠,١٢٨	٠,٢١١	٠,٠٨٨
٢٤٠	٠,٠٩٨	٠,١٦٢	٠,١١٠	٠,١٨١	٠,٠٩٨	٠,١٦٢	٠,٠٨٨

وكما ذكرنا سابقا فإنه في حالة عدم توافر قيم فقد الفولطية فإنه يمكن حسابها من الخواص الكهربية للكابل كما يلي:

في حالة دوائر الوجه الواحد

$$mv/m/A = 2Z$$

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

أما في حالة دوائر الثلاثة أوجه فإن:

$$mv/m/A = \sqrt{3}Z$$

فمثلا للكابل النحاسي ذي قلب واحد ومساحة مقطع ٢٤٠ مم٢ في وضع مسطح نجد أن:

المقاومة (R) = ٠,٠٩٨ أوم/كيلومتر ، المفاعلة (X) =٠,١٨١ أوم/كيلومتر

وتكون $z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0.098)^2 + (0.181)^2} = 0.2058\,\Omega/km$

ويكون فقد الفولطية: $mV/m/A = 2*0.2058 = 0.4116\ mV/m/A$

أما إذا استخدم نفس الكابل في دائرة ثلاثة أوجه يكون فقد الفولطية:

$$mv/m/A = \sqrt{3}Z = \sqrt{3} \times 0.2058 = 0.3564\ mv/m/A$$

الأخطاء في الكابلات الكهربية

الكابلات الكهربية من أقل عناصر منظومة القوى تعرضا للأخطاء وذلك لتعرضها لاختبارات عديدة لضمان جودتها في المصنع وكذلك اختبارات بعد التركيب وقبل التشغيل ولكن هذا لا يمنع من حدوث بعض الأخطاء. ولأن الكابل مكون من عدة طبقات (الموصل – والعازل – والغلاف المعدني – وطبقة الحماية الخارجية) فسوف نصنف الأخطاء في الكابلات تبعا للجزء الذي يحدث فيه الخطأ.

٣- ٩ : أنواع الأخطاء في الكابلات وأسباب حدوثها

أولا: أخطاء الموصل :

الأخطاء التي تحدث في الموصل تكون غالبا لأسباب خارجية وأهم هذه الأخطاء:

١. انقطاع موصل الكابل: ويحدث هذا الخطأ نتيجة لأعمال الحفر في مسار الكابلات المدفونة في الأرض ولتلافي حدوث مثل هذا الخطأ يتم وضع شريط تحذيري فوق مسار الكابل لينبه القائمين بأعمال الحفر بوجود كابل في هذا المكان. ويدفن شريط التحذير في الأرض فوق الكابل بمسافة كافية لتنبيه القائم بالحفر قبل إحداث ضرر في الكابل وعادة يكون تحت سطح الأرض بعمق حوالي ٢٠ سم وفوق الكابل بمسافة ٥٠ سم. وطريقة أخرى لتلافي هذا الخطأ هي استخدام أجهزة خاصة لتحديد مسار الكابل cable locators قبل البدء في عملية الحفر.
٢. أخطاء القصر عند نهايات الكابل وتحدث بسبب وجود أي جسم موصل سواء كان جسماً معدنياً أو كائنات حية كالأفاعي تقوم بتوصيل الجزء المكشوف من نهاية موصل من موصلات الكابل بالأرضي أو بنهاية موصل آخر .

ثانيا: أخطاء العازل

وظيفة العازل هي عزل الموصل عن الغلاف المعدني وعن الموصلات الأخرى ويصمم العازل على تحمل الإجهاد الكهربي الذي يتعرض له في التشغيل العادي وكذلك في الحالات العابرة التي قد يتعرض لها الكابل، وعندما يتعدى الإجهاد الكهربي في العازل الحدود التي يتحملها العازل يحدث له انهيار ويفقد خاصية العزل. ويحدث هذا نتيجة لأسباب مختلفة هي:

١. انهيار الحالة العابرة: يصمم الكابل على تحمل جهد دفعي أكبر بكثير من جهد التشغيل وذلك لفترة زمنية قصيرة جدا (في حدود الملي ثانية أو أقل) وإذا تعرض العازل إلى جهد دفعي أكبر من الذي يمكنه تحمله نتيجة البرق أو عمليات الفصل والتوصيل أو أية ظاهرة عابرة أخرى فإنه ينهار مسببا تفريغا كهربائياً داخل الكابل و حدوث دائرة قصر بين موصل والأرض أو بين موصلين وبعضهما.
٢. انهيار العازل نتيجة التأين: ويحدث هذا النوع من الانهيار نتيجة لوجود فقاعات غازية أو شوائب داخل العازل والتي تسبب تفريغا جزئيا داخل الفقاعة ونتيجة لهذا التفريغ يحدث تدهور تدريجي في خواص العازل إلى أن يحدث انهيار كامل له ما لم يتم اكتشاف هذا العيب قبل ذلك.
٣. الانهيار الحراري: لكل مادة عازلة درجة حرارة تعمل عندها بطريقة سليمة، فإذا ارتفعت درجة حرارة العازل عن تلك الدرجة تبدأ خواص العازل في التدهور تدريجيا إلى أن ينهار. وارتفاع درجة

الحرارة يكون بسبب تعرض الكابل لحمل زائد لفترة طويلة أو تعرضه لتيارات قصر أكبر من تيار القصر المقنن للكابل.

٤. تدهور خواص العازل نتيجة للتقادم وطول فترة الاستخدام أو نتيجة للعوامل البيئية كتسرب الرطوبة لداخل الكابل نتيجة لتآكل الغلاف المعدني.

ثالثا : أخطاء الغلاف المعدني

للغلاف المعدني أهمية كبرى في حماية العازل الرئيسي من العوامل البيئية وكذلك في توزيع المجال الكهربي داخل الكابل وأيضا في احتواء الموائع كالزيت أو الغاز حالة استخدامها للعزل أوللتبريد. ولذلك فإن أخطاء الغلاف المعدني تؤدي حتما إلى أخطاء في الكابل. وتنشأ أخطاء الغلاف المعدني نتيجة للأسباب التالية :

١. تعرض الكابل للاهتزازات أثناء عملية النقل قد تسبب شروخاً في الغلاف المعدني وكذلك تعرض الكابل للثني مرات عديدة
٢. تعرض الغلاف المعدني لتعاقب التمدد والانكماش الحراري نتيجة للتغير الكبير في الحمل زيادة ونقصا بصفة مستمرة يؤدي إلى حدوث إجهاد ميكانيكي وقد يحدث شروخا فيه إذا استمرت هذه العملية لفترات طويلة
٣. أخطاء أثناء عملية البثق (للغلاف الرصاصي) مما يتسبب في وجود شوائب في الغلاف المعدني تمثل نقط ضعف له.
٤. تعرض الغلاف المعدني للتآكل وخصوصا بعد تآكل طبقة الحماية الخارجية
٥. حدوث تلف ميكانيكي نتيجة زيادة الضغط داخل الكابل في الكابلات التي تستخدم الموائع المضغوطة

رابعا : أخطاء طبقة الحماية الخارجية.

رغم أن طبقة الحماية الخارجية ليس لها أية وظيفة كهربية إلا أن حدوث أي خطأ بها يؤدي إلى حدوث خطأ في الغلاف المعدني والذي بدوره يؤدي إلى حدوث تلف في العازل، وأهم خطر يواجه طبقة الحماية الخارجية هو مهاجمة القوارض والنمل الأبيض لها.

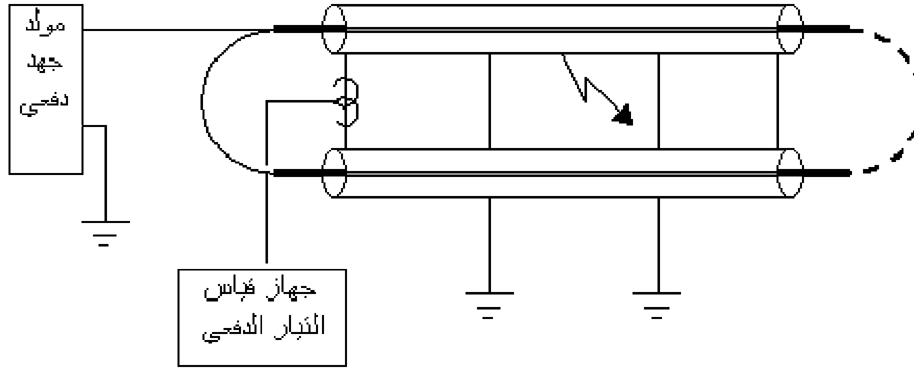
٣- ١٠ : تحديد أماكن حدوث الأخطاء في الكابل:

تحديد مكان الخطأ في الكابل ذو أهمية قصوى وذلك لأنه من غير العملي وغير الممكن حفر طول مسار الكابل كله لمعاينة الخطأ وإصلاحه، و في كابلات الجهد المنخفض يكون من السهل تحديد مكان الخطأ باستخدام فكرة قنطرة القياس المعروفة حيث يتم تكوين قنطرة ضلعها المجهول هو الكابل الذي حدث به الخطأ وعند حدوث اتزان للقنطرة يمكن حساب مقاومة الكابل حتى نقطة الخطأ وبمعلومية مقاومة وحدة الأطوال من الكابل يمكن تحديد طول الكابل من نقطة القياس حتى نقطة الخطأ وتتم هذه الطريقة باستخدام جهد منخفض. أما في حالة كابلات الجهد العالي تكون مقاومة الخطأ عالية حيث لا يمكن تحديد مكان الخطأ بنفس الطريقة. وسنتعرف هنا على طرق تحديد مكان حدوث الخطأ في العازل الرئيسي وكذلك في طبقة الحماية الخارجية.

٣- ١٠- ١ : تحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي

الطريقة الأساسية لاكتشاف وتحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي للكابل هي طريقة التيار الدفعي. في هذه الطريقة يتم توصيل جهد دفعي عالٍ باستخدام مولد جهد دفعي خاص إلى الكابل الذي حدث به الخطأ ويقاس التيار الدفعي في الكابل ويتم تسجيل شكل موجة التيار على كاشف موجات ذي إمكانية تخزين. وأثناء عملية القياس يجب أن تكون كل الأغلفة المعدنية موصولة ببعضها. وللتغلب على تأثير أية وصلات قد تكون موجودة بين بداية الكابل ومكان الخطأ يتم توصيل كابل آخر مع الكابل الذي به الخطأ على التوازي وقياس الفرق بين تياريهما كما في شكل ٣- ٨.

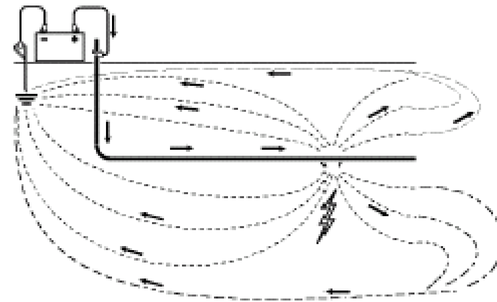
ما يحدث هو أن الجهد الدفعي يسري (ينتقل أو يسافر) كموجة راحلة على طول الكابل، وعند نقطة الخطأ تكون قيمة الجهد صفراً مما يسبب موجات منعكسة على صورة نبضات تنتقل على طول الكابل في الاتجاهين، وهذه النبضات تبدأ في الانعكاس مرات متتالية. ويتم تحديد مكان الخطأ عن طريق قياس الزمن بين انعكاسين متتاليين. وحيث إن الزمن الذي تستغرقه الموجة للانتقال من أول الكابل إلى آخره يكون معلوما من قبل حيث إنه خاصية للكابل- يعرف بزمن الانتشار propagation time - فإنه يمكن تحديد مكان الخطأ عن طريق حساب نسبة الزمن بين انعكاسين متتاليين إلى زمن الانتشار الخاص بالكيبل فيمكن تحديد مكان الخطأ. ولأن سرعة انتقال الموجات في الكابل تعتمد فقط على نوع العازل فإنه يمكن حساب سرعة انتقال الموجة في الكابل ومن ثم ضربها في الزمن بين انعكاسين متتاليين فنحصل على المسافة بين نقطة القياس و نقطة الخطأ.



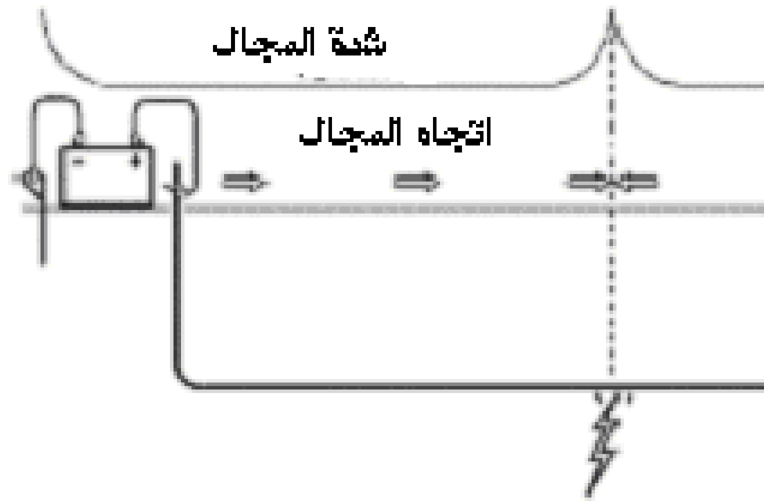
شكل (٣- ٨) طريقة التيار الدفعي لتحديد مكان الخطأ في الكابلات

٣- ١٠- ٢ : تحديد مكان الخطأ المتصل بالأرض :

تعتمد طريقة تحديد هذه النوعية من الأخطاء على حقن تيار مستمر في الكابل، هذا التيار سيجد له مسارا إلى الأرض من خلال نقطة الخطأ ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بشكل (٣- ٩) . ومن شكل توزيع المجال الكهرومغناطيسي يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ وأيضا خطوط المجال الخارجة من عند نقطة الخطأ تتوزع في اتجاهين متضادين. وبالتالي باستخدام أي جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل – عادة عن طريق قياس الجهد المتولد- نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ. وشكل(٣- ١٠)يبين تغير قيمة المجال واتجاهه بدءا من مصدر التيار المستمر وحتى نقطة الخطأ.



شكل (٣- ٩) تحديد مكان الخطأ الأرضي بالكيبل



شكل (٣- ١٠) شدة واتجاه المجال وتحديد نقطة الخطأ

شبكات النقل الكهربائية

القصر الكهربائي في خطوط النقل الكهربائية

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذه الوحدة تكون:

١- ملما بأنواع دوائر القصر المختلفة وأسبابها

٢- ملما كيفية حساب تيار القصر ومقنن القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

٣- ملما بتأثير كل من القصر وزمن الفصل على الشبكة

مستوى الأداء المطلوب:

الوقت المتوقع للتدريب: ٣ ساعات

الوسائل المساعدة:

استخدم التعليمات في هذه الوحدة.

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

٤- ١: مقدمة

في وضع التشغيل العادي تعمل منظومة القوى عند جهد ثابت القيمة والتردد وتكون الجهود على الأوجه الثلاثة وكذلك التيارات متزنة، وتكون قيم التيارات في مختلف أجزاء المنظومة داخل حدود القيم المسموح بها للتشغيل الآمن. ولكن نظرا للانتشار الجغرافي الكبير لمنظومة القوى ولكون معظم مكوناتها موجودة في مساحات مكشوفة –كخطوط النقل والتوزيع التي تقطع مسافات طويلة في الصحاري وداخل المدن والقرى- فإنها تكون عرضة لحدوث أعطال أو أخطاء تؤدي إلى خلل ببعض شروط التشغيل الآمن أو بها جميعا. ولعل أكبر الأعطال خطرا وأشدها تأثيرا ضارا على منظومة القوى هو حدوث دوائر قصر. والمقصود بدوائر القصر هو سلوك التيار مسلكا غير نظامي خارج الموصلات المعدة لسريانه كأن يجد مسارا مباشرا بين أحد الموصلات والأرض أو بين الموصلات نتيجة لانهيار العازل الذي يحكم سريان التيار داخل الموصلات أو سقوط جسم موصل بين الموصلات . ونتيجة للمقاومة الصغيرة جدا لدوائر القصر – تعتبر صفراً نظرا لصغرها مقارنة بمعاوقات أجزاء المنظومة- فإن التيار الناتج عن حدوث دوائر القصر يكون كبيرا جدا وقد يصل إلى أكثر من عشرين ضعف التيار المقنن. وهذا التيار الكبير له آثار تدميرية خطيرة على أجزاء منظومة القوى نتيجة للارتفاع الشديد في درجة الحرارة وكذلك نتيجة للقوى الكهرومغناطيسية الكبيرة الناتجين عن تيار القصر.

ولأنه لا يمكن منع حدوث دوائر القصر فيجب إعداد التجهيزات الخاصة بحماية منظومة القوى بطريقة تمكنها من فصل تيارات القصر بطريقة آمنة. ومن هنا جاءت أهمية دراسة دوائر القصر الكهربي حيث عن طريقها يمكن تحديد تيارات القصر في الأماكن المختلفة من منظومة القوى لتحديد سعة القطع اللازمة للقواطع التي سيتم تركيبها في الدوائر المختلفة لفصلها حالة حدوث خطأ بها. و لضبط مرحلات الحماية يلزم أيضا إجراء تحليل دوائر القصر عند كل نقطة من نقاط المنظومة. والجدير بالذكر هنا أن تحليل دوائر القصر الذي يتم لتحديد سعة القطع للقواطع يختلف عن ذلك الذي يتم لضبط تيار وزمن التشغيل للمرحلات، حيث يجب أن يكون القاطع قادرا على فصل أقصى تيار قصر ممكن حدوثه وبالتالي يتم حساب مقنن القطع للقاطع على أساس من أكبر تيار قصر، في حين أنه يجب ضبط المرحل بحيث يشعر بأقل تيار قصر ممكن حدوثه وبالتالي فإنه يتم إجراء التحليل مع فرض حدوث دائرة القصر عند أبعد مكان من موقع المرحل.

وفي هذه الوحدة سوف نستعرض الأسباب التي تؤدي إلى حدوث دوائر القصر في منظومات القوى، ونتعرف على المصادر التي تغذي دوائر القصر و على أنواع دوائر القصر المختلفة وإن كنا سنكتفي هنا بدراسة القصر المتماثل فقط. ولأن منظومة القوى تحتوي على كثير من المكونات وخصوصا المحولات

التي تفصل الشبكة إلى أجزاء ذات جهود مختلفة يصعب معها إجراء التحليل بطريقة مباشرة فسوف ندرس كيفية تمثيل مكونات المنظومة المختلفة بطريقة تسهل إجراء الحسابات وتتغلب على الصعوبات التي يسببها وجود المحولات، حيث يتم تمثيل مكونات المنظومة بنظام الوحدة.

٤- ٢ : أسباب حدوث القصر في منظومات القوى

إن الأسباب التي تؤدي إلى حدوث دوائر القصر في الدوائر الكهربية كثيرة منها ما هو خارجي ومنها ما هو نابع من منظومة القوى ذاتها، وينشأ القصر الكهربي عموما عندما يجد التيار مسارا خارج الموصلات الكهربية وذلك عندما يحدث تلامس مباشر – نتيجة انهيار العازل – بين الموصل والأرض أوموصلين مع بعضهما ومن أمثلة الأسباب الخارجية لدوائر القصر:

- الطيور والأفاعي عندما تسبب قصرا بين موصلات خطوط النقل أو بين أحد الموصلات وجسم البرج
- اصطدام طائرة بخطوط النقل الهوائي
- اصطدام سيارة بمحول أو عمود
- الفئران عندما تأكل عازل الكابلات وتجعل الموصل مكشوفا ملامسا للأرض أو عندما تدخل في لوحات التوزيع فتسبب توصيل أحد القضبان بجسم اللوحة أو توصيل قضيبين ببعضهما
- سقوط شجرة على موصلات خط النقل
- الأعمال التخريبية المتعمدة
- الرياح الشديدة قد تسبب التواء أسلاك خط النقل وملامستها لبعضها
- انقطاع أحد الموصلات تحت تأثير التحميل الميكانيكي الزائد نتيجة لتراكم ثلوج عليه وملامسته لموصل آخر أو لجسم البرج
- صواعق البرق عندما تضرب خط النقل وتسبب ارتفاع الجهد بطريقة كبيرة تؤدي إلى انهيار عوازل خط النقل أو المحولات

و الأسباب الداخلية تتلخص في انهيار عازل الموصلات في المولد أو المحول أو المحرك وتصبح هذه الموصلات كما لو كانت مكشوفة وتتسبب في قصر إما بين لفتين لنفس الوجه أو بين لفات أحد الأوجه وجسم المولد أو المحول أو المحرك، أو تسبب قصراً بين ملفات وجهين مختلفين.

٤- ٣ : مصادر دوائر القصر

أثناء حدوث القصر تمر تيارات كبيرة جدا نتيجة للمقاومة الصغيرة للشبكة أثناء حدوث القصر، وهذه التيارات تكون أكبر بكثير من تيار الحمل ولذا فإنه يتم إهمال جميع الأحمال الموجودة بالشبكة قبل حدوث الخطأ. والمصادر التي تقوم بتغذية تيار القصر هي:

٤- ٣- ١ : المولدات التزامنية

حيث إن هذه المولدات هي مصادر الجهد التي تغذي المنظومة في حالة التشغيل العادي، فعند حدوث القصر تستمر هذه المولدات في إمداد المنظومة بالجهد فتدفع بتيار كبير خلال دائرة القصر وذلك قبل أن تعمل أجهزة الحماية وأجهزة التحكم المختلفة. وفي اللحظات التي تلي حدوث القصر مباشرة يرتفع التيار بصورة كبيرة قبل أن تبدأ أجهزة التحكم في العمل لضبط قيمة الجهد فلذلك تكون القوة الدافعة للمولد ثابتة رغم ارتفاع التيار بهذه الصورة الكبيرة والسبب في ذلك يرجع إلى أنه عند حدوث الخطأ فإن قيمة ممانعة المولد تختلف عن قيمتها في وضع التشغيل العادي بسبب تغير قيمة المفاعلة الحثية له نتيجة التغيرات التي تطرأ على المجال المغناطيسي داخل المولد، حيث تنخفض مفاعلة المولد بثلاث مراحل هي:

ممانعات المولد

١. **مفاعلة دون الحالة العابرة** (x''_d) sub-transient reactance

وهي قيمة المفاعلة لحظة حدوث الخطأ، وهي صغيرة جدا حيث يكون تيار الخطأ في هذه اللحظات أكبر ما يمكن، وهذه القيمة هي التي تستخدم عند حساب تيار القصر.

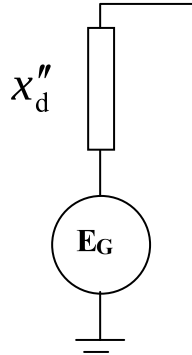
٢. **مفاعلة الحالة العابرة** (x'_d) transient reactance

وهي قيمة المفاعلة بعد حدوث الخطأ بفترة زمنية قصيرة لا تتعدى بضع دورات، وهي أكبر من مفاعلة دون الحالة العابرة، وهذه القيمة تستخدم في دراسة اتزان المنظومة بعد إزالة الخطأ وعمل أجهزة التحكم.

٣. **مفاعلة التزامن** synchronous reactance (x_s)

وهي قيمة المفاعلة في وضع التشغيل العادي أو بعد فترة طويلة من حدوث الخطأ، وتستخدم هذه المفاعلة في حساب أداء المولد في ظروف التشغيل العادية.

وتكون الدائرة المكافئة للمولد حالة حدوث خطأ عبارة عن جهد ثابت يساوي القوة الدافعة الكهربية للمولد بالتوالي مع مفاعلة دون الحالة العابرة وتهمل المقاومة، كما هو موضح في شكل (٤- ١) :



شكل (٤- ١) الدائرة المكافئة للمولد

٤- ٣- ٢ : المحركات والمكثفات التزامنية

المكثف التزامني هو آلة تزامنية متصلة بالقضبان العمومية ولكنها لا تدار بمحرك أولي لتعمل كمولد ولا تغذي حملا ميكانيكيا للعمل كمحرك – وإن كان من الممكن تشغيل نفس الآلة كمحرك والاستفادة منها كمكثف تزامني- وإنما يتم تغذية أقطابها بتيار كبير يجعلها تدفع بقدرة غير فعالة إلى الشبكة أي إنها تعمل عمل المكثف ولذا يطلق عليها المكثف التزامني.

رغم أن المحركات والمكثفات التزامنية لا تدار بواسطة محرك أولي إلا أنه عند حدوث القصر ونتيجة للقصور الذاتي للأجزاء الدوارة في كل منهما والطاقة الميكانيكية المختزنة في هذه الأجزاء الدوارة يستمر كل من المحرك والمكثف التزامني في الدوران وتوليد جهد يقوم بتغذية دائرة القصر.

وفي حالة التشغيل العادي تتشابه الدائرة المكافئة للمحرك والمكثف التزامني مع الدائرة المكافئة للمولد إلا أن اتجاهات سريان القدرة في المولد تختلف عنها في المحرك والمكثف. وفي حسابات تيار القصر، لا تختلف الدائرة المكافئة للمحرك ولا للمكثف التزامني عن المولد في شيء ، بل تكون الدائرة المكافئة للمولد هي نفسها للمحرك وللمكثف التزامني ولكن طبعا قد تختلف القيم العددية للجهد و للمعاوقة.

٤- ٣- ٣ : المحركات الحثية

للمحركات الحثية ذات القدرات الأكبر من ٥٠ حصان (50 hp) تكون الطاقة الميكانيكية المختزنة في العضو الدائر كافية لدفع المحرك لتوليد جهد يقوم بتغذية تيار القصر ويعامل معاملة المولد التزامني من حيث الدائرة المكافئة. أما المحركات الأصغر من ذلك فيمكن إهمال مساهمتها في تغذية تيار القصر.

٤- ٣- ٤ : منظومة الإمداد

ومنظومة الإمداد تحتوي على مجموعة كبيرة من المولدات وشبكة نقل وتوزيع ذات مقاومة صغيرة، ويمكن النظر إلى منظومة الإمداد على أنها مصدر ذو جهد ثابت و ممانعة كهربية على التوالي في الغالب تكون صغيرة بدرجة كبيرة، ومثل هذه المنظومة تساهم في تغذية تيار القصر حيث إن جهدها يظل ثابتا حتى أثناء حدوث القصر.

٤- ٤ : النظام بالوحدة

في دراستك للآلات الكهربية رأيت كيف أن المحول يقسم الدائرة الكهربية إلى جزأين غير مرتبطين عن حساب طريق التوصيل حتى يمكن تطبيق قوانين كيرشوف للتيار والجهد، وإنما يرتبطان معا عن طريق الحث الكهرومغناطيسي و كل منهما له جهد مختلف عن الآخر. ولحساب أداء المحول كان لزاما نسبة معاملات أحد الجانبين إلى الجانب الآخر و إجراء الحساب في جانب واحد ثم للحصول على القيم الحقيقة للجانب الآخر نعيد القيم المحسوبة بنسب التحويل العكسية. ولعلك مازلت تذكر كم كانت هذه الحسابات مزعجة وخصوصا بما فيها من أعداد مركبة.والجهد ينقل بنسبة اللفات والتيار بعكس نسبة اللفات والمعاوقات بمربع نسبة اللفات و لو كان المحول ثلاثي الأوجه وكان أحد جانبيه متصلاً دلتا والآخر متصلاً نجمة، فما بالك عند العمل على منظومة قوى تحتوي على أكثر من محول بل ربما تصل إلى مئات أو آلاف المحولات؟!!! هل سيكون الأمر صعبا أم مستحيلا أم لا يجب أن نفكر في مثل هذا الأمر من البداية؟ الإجابة على السؤال الأخير طبعا لا لن يكون صعبا ولا مستحيلا ولن نشغل تفكيرنا بالمحولات قلت أو كثرت طالما أن هناك النظام بالوحدة.

ففي النظام بالوحدة يتم تمثيل معاوقات مكونات منظومة القوى كنسب من قيم إسنادية يتم تحديدها بطريقة تحقق المميزات الآتية:

١. في النظام بالوحدة لا تمثل المحولات مشكلة حيث إن قيم المعاوقات- مقدرة بالوحدة- تكون ثابتة بغض النظر عن الجهة التي تسند إليها في حين أنه عند تقدير المعاوقات بالأوم يلزم أن تنسب جميع المعاوقات إلى جهة واحدة أو جزء واحد من المنظومة.
٢. في النظام بالوحدة لا تؤثر كيفية توصيل المحولات على قيمة المعاوقة
٣. معاوقات الآلات الكهربية تختلف اختلافا كبيرا إذا ما قيمت بالأوم تبعا لحجمها أما في النظام بالوحدة فإنها تختلف في حدود ضيقة للغاية وعلى ذلك يمكن تقدير معاوقة آلة بمقارنتها بأخرى من نفس النوع بغض النظر عن الحجم.

٤. معاوقات الآلات الكهربية تعطى عادة مقدرة بالوحدة على لوحة البيانات الاسمية للآلة مما يجعلها مهيأة للاستعمال بأخذ مقننات الآلة كقيم إسنادية.

وعموما في معظم الحالات في حياتنا العامة تكون الأرقام الحقيقية غير ذات مدلول إلا إذا وضعت في صورة نسبة، فمثلا إذا قلنا أن عدد الطلبة الناجحين في مادة الشبكات هو ٩٠ طالباً فسيتبادر إلى الذهن سؤال آخر ، كم عدد الطلاب الذين أدوا الاختبار أو كم عدد الراسبين فيها؟ ولكن إذا قلنا إن نسبة الطلبة الناجحين في مادة الشبكات هي ٧٥٪ فهي أكثر دلالة لأنها في نفس الوقت تعطي فكرة عن عدد الذين لم يجتازوا الاختبار. وأول خطوة لتمثيل مكونات منظومة القوى بنظام الوحدة هي تحديد أوتعريف القيم النسبية.

٤- ٤- ١: تعريف القيم النسبية

في الكثير من النظم يكون تحديد القيم الإسنادية مباشرا ففي مثال نتيجة الاختبار تم أخذ عدد الطلاب الذين أدوا الاختبار كقيمة إسنادية وإذا أردنا أن نحدد معدل النمو السكاني في المملكة أخذنا عدد السكان كقيمة إسنادية. والأمر في منظومة القوى يختلف بعض الشيء وذلك لأن:

- يلزم تحديد قيم اسنادية لأكثر من كمية كهربية وهي القدرة والجهد والتيار والمعاوقة
- هذه الكميات ليست مستقلة عن بعضها ولكن تربطها علاقات يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند تحديد القيم الإسنادية

و لتحديد القيم الإسنادية للكميات الكهربية الأربعة (القدرة والجهد والتيار و المعاوقة) لا يمكن تحديد قيمة إسنادية لكل كمية بطريقة منفصلة عن البقية، ولكن يتم تحديد قيم إسنادية لاثنتين من هذه الكميات ثم حساب القيم الإسنادية للكميتين الأخريين من القيم المحددة. وعادة يتم تحديد القيمة الإسنادية للقدرة والجهد وحساب القيم الإسنادية للتيار والمقاومة.

ويتم تحديد القيم الإسنادية لمنظومة القوى كالآتي:

يتم اختيار قيمة إسنادية للقدرة في الأوجه الثلاثة (total three phase power) وسوف نرمز لها بالرمز (MVA_b) لأنها عادة تكون مقدرة بالميجا فولت أمبير (١ ميجا فولت أمبير = ١٠٠٠ كيلو فولت أمبير = ١٠٠٠٠٠٠ فولت أمبير)، وهذه القيمة تكون ثابتة لجميع أجزاء المنظومة ولا تتأثر بوجود المحولات حيث إن المحولات لا تغير من قيمة القدرة. ويفضل اختيار قيمة إسنادية تتناسب مع مقننات عناصر منظومة القوى وإلا عادة ما تؤخذ $MVA_b = 100$ MVA، ويفضل أيضا وضع هذه القيمة في مستطيل أعلى مخطط منظومة القوى لتوضيحها.

١. تحديد قيمة إسنادية لجهد الخط (line to line voltage) مقدرة بالكيلو فولت في أحد أجزاء المنظومة وسوف نرمز لها بالرمز (kV_b)، و الفواصل بين أجزاء المنظومة هي المحولات، ولذلك في حالة عدم وجود محولات تعتبر المنظومة جزءا واحدا، أما كل محول فيضيف جزءا آخر للمنظومة، فالمنظومة التي تحتوي على محولاً واحد تنقسم إلى جزأين والتي تحتوي على محولين تنقسم إلى ثلاثة أجزاء والتي بها ١١ محول تنقسم إلى ١٢ جزءاً، مع مراعاة أن المحولات المتصلة على التوازي تعد كأنها محول واحد. وبمجرد تحديد القيمة الإسنادية للجهد في أحد أجزاء المنظومة لا يكون لنا الخيار في تحديد القيم الإسنادية للجهد في باقي الأجزاء حيث إنه يتم حسابها من القيمة المحددة ونسب تحويل المحولات، حيث إنه يجب أن تكون القيم الإسنادية للجهد في جميع أجزاء المنظومة متناسبة مع نسبة تحويل المحولات (نسبة جهد الخط في المنظومات ثلاثية الأوجه وبذلك لا يكون لكيفية توصيل جانبي المحول أي تأثير على الحسابات). ويفضل أن توضع القيمة الإسنادية للجهد في كل من أجزاء المنظومة داخل شكل بيضاوي للوضوح وسهولة الوصول إلى القيم الإسنادية عند الحاجة إليها.

٢. تحسب القيمة الإسنادية للتيار (**I_b**) مقدرة بالأمبير في كل من أجزاء المنظومة من القيمة الإسنادية للجهد في هذا الجزء والقيمة الإسنادية للقدرة. من العلاقة التالية:

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} \qquad (4.1)$$

٣. يتم حساب القيمة الإسنادية للمعاوقة (**Z_b**) في أي من أجزاء المنظومة مقدرة بالأوم من العلاقة التالية:

$$Z_b = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} \qquad (4.2)$$

في كثير من الأحيان تكون لدينا المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس قيم إسنادية معينة ونحتاج إلى تقدير نفس المعاوقة بالوحدة على أساس من قيم إسنادية أخرى، وكثيرا ما نواجه هذه الحالة مع المولدات والمحركات والمحولات والتي تكون معاوقاتها مقدرة بالوحدة باستخدام القدرة المقننة للآلة والجهد المقنن لها كقيم إسنادية و في الغالب يحدث اختلاف بين هذه القيم والقيم الإسنادية المحددة للمنظومة. ولإجراء التعديل على أساس القيم الإسنادية الجديدة نحتاج لحساب المقاومة الحقيقية للآلة مقدرة بالأوم ثم نقسمها على القيمة الإسنادية الجديدة. ولكن هذه العمليات يمكن اختصارها باستخدام العلاقة الآتية:

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}} \right) \left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}} \right)^2 \quad (4.3)$$

حيث Z_{old} هي قيمة المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس القيم الإسنادية القديمة

kV_{old} هي القيمة الإسنادية القديمة للجهد والتي عادة ما تكون هي الجهد المقنن للآلة

MVA_{old} هي القيمة الإسنادية القديمة للقدرة والتي عادة ما تكون هي القدرة المقننة للآلة

Z_{new} هي قيمة المعاوقة مقدرة بالوحدة على أساس القيم الإسنادية الجديدة

KV_{new} هي القيمة الإسنادية الجديدة للجهد

MVA_{new} هي القيمة الإسنادية الجديدة للقدرة

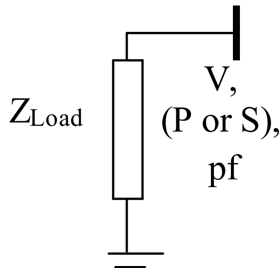
وقد تعمدنا كتابة هذه المعادلة بهذا الخط الكبير نظرا لأهميتها القصوى، لأن تمثيل أية منظومة حقيقية بنظام الوحدة لا يمكن أن يتم بدون استعمال هذه المعادلة لتعديل قيم معاوقات الآلات على أساس من القيم الإسنادية للمنظومة بدلا من قيمتها المحسوبة على أساس مقنناتها. وقبل التعامل مع منظومة كاملة وتمثيلها سنوضح أولا كيفية تمثيل عناصر منظومة القوى المختلفة.

٤- ٤- ٢: تمثيل عناصر منظومة القوى

سبق أن أشرنا أنه لحساب تيار القصر في منظومة القوى نهمل جميع الأحمال الموجودة قبل حدوث الخطأ ونهمل كذلك المقاومات الموجودة و جميع أفرع التوازي يتم أيضا إهمالها ونفرض أن جهود جميع مصادر تغذية القصر متساوية وتساوي الوحدة. وفى ضوء هذه الفروض سوف نرى الآن كيف يتم تمثيل عناصر منظومة القوى.

تمثيل الأحمال

يمثل الحمل بمعاوقة كما هو موضح بشكل (٤- ٢). ويكفي لتحديد معاوقة الحمل معرفة القدرة التي يستهلكها هذا الحمل عندما يعمل عند جهد معين وكذلك معامل القدرة له. ويتم حساب معاوقة الحمل كالآتي:



شكل ٤- ٢ تمثيل الحمل

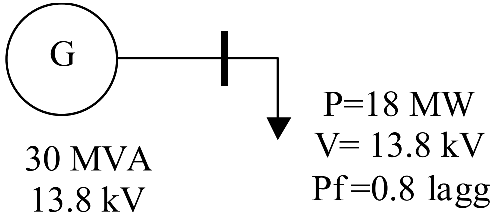
$$Z_L = \frac{V^2}{S} \angle \pm \cos^{-1}(pf) = \frac{V^2 . pf}{P} \angle \pm \cos^{-1}(pf) \quad \Omega$$

حيث (V) هو جهد الحمل بالفولت، وS هي القدرة الظاهرية للحمل بالفولت أمبير، وP هي القدرة الفعالة للحمل بالوات، و pf معامل القدرة للحمل. وتؤخذ الإشارة الموجبة لزاوية المعاوقة إذا كان معامل القدرة متأخرا و تؤخذ الإشارة السالبة في حالة معامل القدرة المتقدم.

تمثيل المولد

كما وضحنا سابقا يتم تمثيل المولد كما في شكل (٤- ١) بمصدر جهد بالتوالي مع معاوقة تساوي مفاعلة الحالة دون العابرة، وكذلك المحركات والمكثفات التزامنية والمحركات الحثية. والآن سنورد مثالا على كيفية تمثيل كل من المولد والحمل بنظام الوحدة.

مثال(٤- ١)



شكل (٤- ٣)

شكل(٤- ٣) يوضح مخطط منظومة قوى مبسطة مكونة من مولد وحمل بياناتهما كما هو موضح على الرسم فإذا كانت مقاومة المولد ٢أوم ومفاعلتة ١٠ أوم. ارسم مخطط المعاوقة لهذه المنظومة مع تقدير كافة المعاوقات بالوحدة معتبرا القيم الإسنادية للقدرة والجهد مساوية لمقننات المولد

الحل

القيمة الإسنادية للقدرة وهي ثابتة للمولد والحمل

$$MVA_b = 30 \text{ MVA}$$

القيمة الإسنادية للجهد هي نفسها للمولد والحمل لأنهما غير مفصولين بمحول

$$kV_b = 13.8 \text{ kV}$$

معاوقة الحمل:

$$Z_L = \frac{V^2.pf}{P} \angle \pm\cos^{-1}(pf) = \frac{(13.8)^2 \times 0.8}{18} \angle \cos^{-1}(0.8)$$
$$= 8.464 \angle 36.87^\circ = 6.7712 + j5.0784 \ \Omega$$

القيمة الإسنادية للمعاوقة

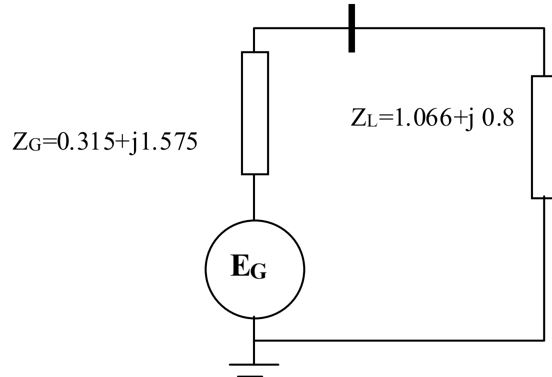
$$Z_b = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} = \frac{(13.8)^2}{30} = 6.348\,\Omega$$

وتكون قيم المعاوقات مقدرة بالوحدة مساوية لخارج قسمة المعاوقة مقدرة بالأوم على القيمة الإسنادية للمعاوقة، فتكون:

$$Z_G = \frac{2 + j10}{6.348} = 0.315 + j1.575 \text{ pu}$$

$$Z_L = \frac{6.7712 + j5.0784}{6.348} = 1.0667 + j0.8 \text{ pu}$$

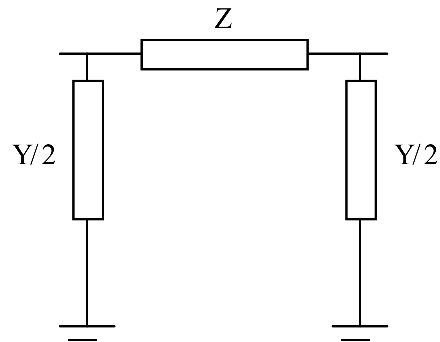
والرمز (pu) يعني وحدة، ومخطط المعاوقة لهذه المنظومة موضح في شكل (٤- ٤) .



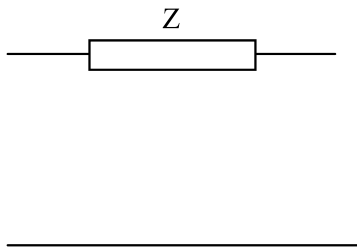
شكل (٤- ٤) مخطط المعاوقة للمنظومة

تمثيل الخطوط

لدراسة أداء المنظومة في الحالة المستقرة يتم تمثيل الخط بدائرة Π المكافئة حيث تقسم سعة الخط إلى نصفين يوضع أحدهما في بداية الخط والآخر في نهايته (شكل ٤- ٥- أ). وهذا التمثيل بالإضافة إلى أنه يقرب أداء الخط بدقة مقبولة فإنه لا يضيف نقاطا nodes جديدة إلى الدائرة المكافئة لمنظومة القوى كما هو الحال في حالة تمثيله بدائرة T و بالتالي لا يزيد في أعباء الحسابات للمنظومة. وفي دراسة القصر تهمل سعة الخط ويمثل بمعاوقة على التوالي فقط (شكل ٤- ٥ – ب) وتقدر معاوقة الخط بالوحدة وذلك بقسمة المعاوقة مقدرة بالأوم على القيمة الإسنادية للمعاوقة في دائرة الخط.



(أ) تمثيل خط النقل بدائرة π



(ب) تمثيل خط النقل لدراسات القصر

شكل (٤- ٥) تمثيل خط النقل

تمثيل المحول

يتم تمثيل المحول بمعاوقة على التوالي – بإهمال دائرة التوازي الممثلة لتيار اللاحمل - كما في حالة خط النقل وتكون الدائرة المكافئة للمحول مماثلة تماما للدائرة المكافئة لخط النقل (شكل ٤- ٥- ب) وأيضا يتم تقدير المعاوقة بالوحدة وكما ذكرنا أن قيمة معاوقة المحول لا تعتمد على أي جانب تمت نسبتها مع مراعاة أنه يوجد قيمة إسنادية للجهد لكل جانب من جانبي المحول تختلف عن نظيرتها في الجانب الآخر، وسنوضح هذه المزية لنظام الوحدة بمثال.

مثال (٤- ٢)

محول 13.8/1.38 KV قدرته المقننة 30 MVA ، وكانت معاوقة ملفات الجهد العالي $z_1= 1.25 + j\ 2\ \Omega$ ومعاوقة ملفات الجهد المنخفض $z_2= 0.0175 + j\ 0.02\ \Omega$. احسب المعاوقة الكلية للمحول مقدرة بالوحدة مرة بنسبة المعاوقات إلى ناحية الجهد العالي وثانية بنسبتها إلى الجهد المنخفض و ثالثة بدون نسبة أي ببقاء مقاومة كل جانب مكانها.

الحل

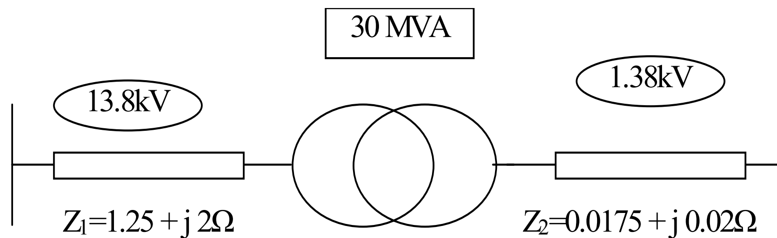
شكل (٤- ٦) يوضح مخطط المحول ومعاوقاته وعلى الرسم أيضا تم وضع القيم الإسنادية للقدرة والجهود على جانبي المحول. وقد تم اختيار القيمة الإسنادية للقدرة مساوية للقدرة المقننة للمحول طالما أنه ليس هناك عناصر أخرى فهي أنسب قيمة. أي إن $MVA_b= 30\ MVA$

والقيمة الإسنادية للجهد في جانب الجهد العالي أخذت مساوية لجهد المحول أيضا. $KV_{b1}= 13.8\ kV$

أما القيمة الإسنادية للجهد في جانب الجهد المنخفض فتم حسابها باستخدام نسبة جهود المحول كالآتي:

$$kV_{b2} = kV_{b1} \times \frac{V_2}{V_1} = 13.8 \times \frac{1.38}{13.8} = 1.38\ kV$$

والقيمة الإسنادية للقدرة موضوعة داخل مستطيل وهي ثابتة لجانبي المحول، في حين أن القيم الإسنادية للجهد لكل جانب موضوعة داخل شكل بيضاوي كل في الجانب الخاص بها.



شكل (٤- ٦) مخطط المحول ومعاوقاته

والآن لنحسب القيم الإسنادية للمعاوقة على جانبي المحولبالنسبة لجانب الجهد العالي:

$$Z_{b1}=\frac{(kV_{b1})^2}{MVA_b}\quad=\frac{(13.8)^2}{30}\;=6.348\,\Omega$$

وبالنسبة لجانب الجهد المنخفض:

$$Z_{b2}=\frac{(kV_{b2})^2}{MVA_b}\quad=\frac{(1.38)^2}{30}\;=0.06348\,\Omega$$

أ: نسبة المعاوقات إلى جانب الجهد العالي

$$Z_{eq}=Z_1+Z_2'\;=Z_1+Z_2\times\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

$$=\;1.25+j\,2\;+(0.0175+j\,0.02)\left(\frac{13.8}{1.38}\right)^2\;=\;1.25+j\,2\;+1.75+j\,2\;=3+j4\,\Omega$$

وتكون معاوقة المحول مقدرة بالوحدة (Z_{pu}):

$$Z_{pu}=\frac{Z_{eq}}{Z_{b1}}\;=\frac{3+j4}{6.348}\;=\;0.4726+j\,0.63\;\text{ pu}$$

ب : نسبة المعاوقات إلى جانب الجهد المنخفض

$$Z_{eq}=Z_2+Z_1'\;=Z_2+Z_1\times\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2$$

$$=\;0.0175+j\,0.02\;+(1.25+j\,2)\left(\frac{1.38}{13.8}\right)^2\;=0.0175+j0.0\,2+1.25+j\,2\;+\;=0.03+j0.04\,\Omega$$

وتكون معاوقة المحول مقدرة بالوحدة (Z_{pu}):

$$Z_{pu}=\frac{Z_{eq}}{Z_{b2}}\;=\frac{0.03+j0.04}{0.06348}\;=\;0.4726+j\,0.63\;\text{ pu}$$

وواضح أنها نفس القيمة التي حصلنا عليها في (أ). والآن سنقوم بحساب معاوقة كل جانب بالوحدة ثم نوجد المعاوقة المكافئة للمحول مقدرة بالوحدة

ج : بدون نسبة المعاوقات

نحسب معاوقة الجهد العالي بالوحدة

$$Z_{1\,pu}=\frac{Z_1}{Z_{b1}}\;=\frac{1.25+j2}{6.348}\;=\;0.1969+j\,0.315\;\text{ pu}$$

نحسب معاوقة الجهد المنخفض بالوحدة

$$Z_{2pu} = \frac{Z_2}{Z_{b2}} = \frac{0.0175 + j0.02}{0.06348} = 0.2757 + j0.315 \text{ pu}$$

وتكون المعاوقة الكلية للمحول مقدرة بالوحدة :

$$Z_{pu} = Z_{1pu} + Z_{2pu} = 0.1969 + j0.315 \text{ pu} + (0.2757 + j0.315)$$
$$= 0.4726 + 0.63 \text{ pu}$$

وهي نفس القيمة التي حصلنا عليها في الحالتين السابقتين. ولعله من الواضح الآن أن تقدير المعاوقات بالوحدة لا يتأثر بوجود المحولات.

٤- ٥ : أنواع القصر الكهربائي:

أنواع دوائر القصر التي يمكن أن تحدث في منظومة القوى هي:

أ. القصر المتماثل ثلاثي الأوجه symmetrical three phase fault

وفيه تكون الأوجه الثلاثة مقصورة معا كما في شكل (٤- ٧- أ) ولذلك تكون التيارات في الأوجه الثلاثة متماثلة ، ويستوي في هذه الحالة اتصال الأوجه الثلاثة بالأرض وعدم اتصالهم بها. وهذا النوع هو الأقل حدوثا ولكنه أشد دوائر القصر خطرا على منظومة القوى حيث يكون تيار القصر أكبر منه في باقي حالات القصر ولذلك يتم استخدام تيار القصر في هذه الحالة لتحديد مقننات القواطع.

ب. القصر خط – أرض single line to ground fault

وفي هذا النوع يحدث اتصال بين وجه والأرض كما في شكل (٤- ٧- ب) وهو الأكثر حدوثا في منظومات القوى وأكثر ما يحدث في خطوط النقل، والتيار الناتج عن هذا القصر يكون هو الأقل في معظم الحالات،ويكون التيار في الوجه الذي حدث عليه القصر كبيراً في حين يكون التيار في الوجهين الآخرين صفراً ولذلك تكون المنظومة في حالة عدم اتزان unbalance كبير في الجهد وفي التيار.

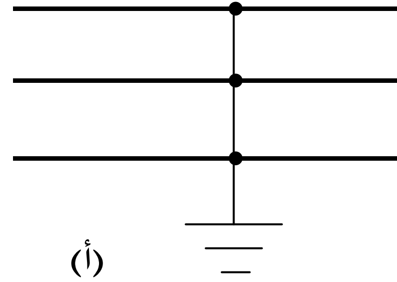
ج. القصر خط – خط line to line fault

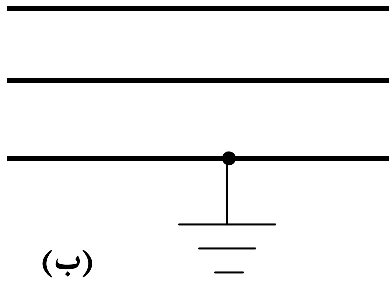
و هذا النوع موضح في شكل (٤- ٧- ج) حيث يحدث اتصال بين خطين بعيدا عن الأرض وهو أيضا خطأ غير متماثل لأن الأوجه الثلاثة ليست معرضه لنفس الظروف، فهنا نجد أن خطين اتصلا

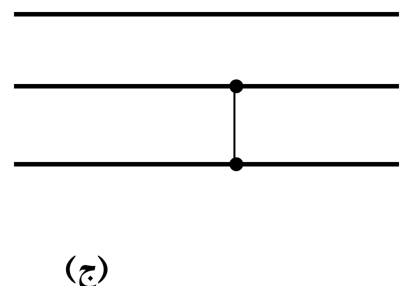
فأصبح جهد كل منهما مساوياً لجهد الآخر و التيار في أحدهما مساو ومعاكس للتيار في الآخر في حين أن الخط السليم تياره صفر وجهده مختلف عن الآخرين .

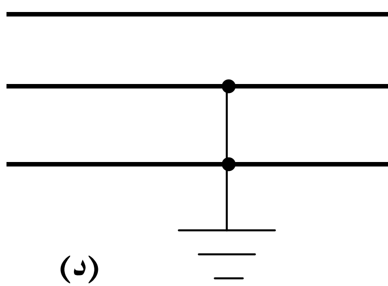
د. القصر خطين – أرض **double line to ground fault**

وكما هو موضح في شكل (٤- ٧- د) اتصال بين خطين مع الأرض وهو أيضا خطأ غير متماثل لنفس السبب وهو أن الأوجه الثلاثة ليست معرضة لنفس الظروف، وهنا فإن جهد الخطين المتصلين بالأرض يصبح صفرا ويكون تيار القصر المار إلى الأرض هو مجموع تياري القصر في كل من الخطين.









شكل (٤- ٧) أنواع دوائر القصر على منظومة القوى

وكما أوضحنا أنه فيما عدا الخطأ ثلاثي الأوجه فجميع الأخطاء الباقية غير متماثلة و عدم التماثل ليس نتيجة لعدم تماثل التيارات والجهود فحسب ولكن لعدم تماثل الأوجه الثلاثة للشبكة نفسها، وبالتالي لا يمكن تحليل هذه الأخطاء بإجراء الحسابات لوجه واحد كما نفعل في حسابات الأداء في الظروف العادية أو لحساب تيار القصر في حالة الخطأ المتماثل، بل يلزم هنا إيجاد دوائر التتابع الموجب

والسالب والصفري للشبكة وتوصيلها معا بطريقة تعتمد على نوع الخطأ للحصول على المركبات المتماثلة لتيار القصر. وفي هذا المقرر سنكتفي بحساب تيار القصر المتماثل ثلاثي الأوجه فقط ولن نتعرض لحساب تيار القصر غير المتماثل.

٤- ٦ : حساب تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

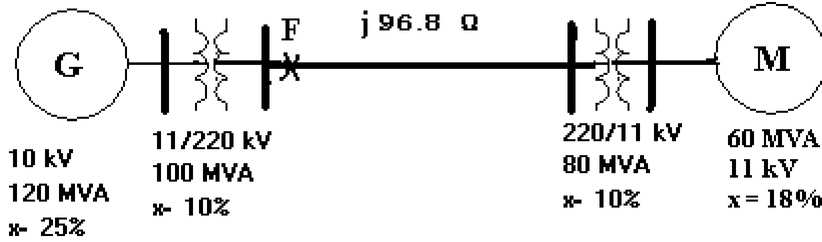
لحساب تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه عند نقطة معينة في منظومة القوى يكفي تمثيل وجه واحد فقط وإجراء الحسابات له وما يحدث في هذا الوجه هو نفسه ما يحدث في الوجهين الآخرين ولكن مع إزاحة في زاوية الطور مقدارها 120 درجة بين كل وجه والآخر. وإذا بدأنا بمخطط الخط الواحد لمنظومة القوى فإن خطوات حساب تيار القصر تتمثل في الآتي:

١. تحديد قيمة إسنادية للقدرة للمنظومة وقيمة إسنادية في أحد أجزاء المنظومة وحساب القيم الإسنادية للجهد في باقي أجزاء المنظومة باستخدام نسب تحويل المحولات، ومن ثم تقدير قيم معاوقات عناصر المنظومة بالوحدة على أساس هذه القيم الإسنادية.
٢. نرسم مخطط المعاوقة للمنظومة في حالة حدوث الخطأ، ولتنفيذ ذلك بسهولة، نرسم خطا أفقيا يمثل الأرض (G) وخطا آخر مواز له ويبعد عنه مسافة كافية يمثل النقطة التي حدث عندها الخطأ (F).
٣. نبدأ بتوصيل الدائرة المكافئة لمصدر من مصادر تغذية الخطأ بخط الأرض ثم الدوائر المكافئة للعناصر المتصلة بهذا المصدر وتشكل مسارا متصلا حتى نقطة الخطأ ونكرر هذا لجميع المسارات الممكنة لتغذية الخطأ عن طريق هذا المصدر.
٤. نكرر الخطوة ٣ لجميع مصادر تغذية تيار القصر وبعد الانتهاء نبدأ في اختصار الدائرة الكهربية الناتجة، حيث نبدأ بتوصيل القوى الدافعة لجميع المصادر على التوازي والاستعاضة عنها بقوة دافعة كهربية وحيدة تساوي الوحدة، ثم نبدأ في اختصار المعاوقات إلى معاوقة واحدة.
٥. بعد اختصار المعاوقات تصبح الدائرة عبارة عن مصدر جهد واحد بالتوالي مع معاوقة واحدة حيث تعرف هذه الدائرة بدائرة التتابع الموجب ، ويكون تيار الخطأ عبارة عن خارج قسمة جهد المصدر على قيمة المعاوقة. ولنرى كيف يتم ذلك بمثال على منظومة قوى.

مثال (٤- ٣):

لمنظومة القوى الموضحة بالشكل التالي احسب تيار القصر إذا حدث خطأ متماثل ثلاثي الأوجه عند النقطة F في بداية خط النقل من ناحية المولد بفرض أن القوة الدافعة الكهربية لكل من المولد والمحرك قبل حدوث الخطأ كانت مساوية 10kV ، بيانات جميع مكونات المنظومة موجودة على الرسم.

اعتبر القيمة الإسنادية في دائرة المولد هي 100MVA للقدرة، و 10kV للجهد. احسب توزيع تيار القصر في كل جزء من أجزاء المنظومة مقدرا بالوحدة وبالأمبير.



شكل (٤- ٨- أ) بيانات منظومة القوى

الحل

نظرا للاختلاف في مقننات مكونات منظومة القوى فإنه سيلزم تعديل قيم المعاوقات على أساس القيم الإسنادية المحددة.

فالقيمة الإسنادية للقدرة هي $MVA_b = 100$ MVA وقد أعدنا رسم مخطط المنظومة ووضع القيمة الإسنادية في مستطيل أعلى مخطط المنظومة وهذه هي القيمة الإسنادية للقدرة لكل أجزاء المنظومة وليس لدائرة المولد فقط.

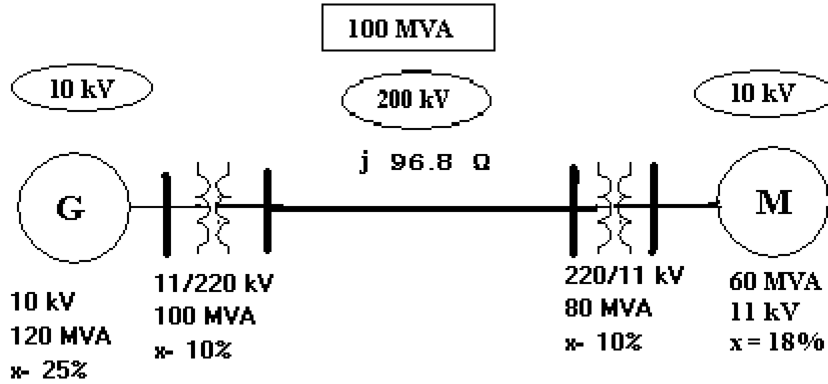
والقيمة الإسنادية للجهد في دائرة خط النقل = القيمة الإسنادية للجهد في دائرة المولد * نسبة تحويل المحول الأول

kV_b (خط النقل في دائرة) $= 10 \times \dfrac{220}{11} = 200kV$

والقيمة الإسنادية للجهد في دائرة المحرك = القيمة الإسنادية للجهد في دائرة خط النقل * نسبة تحويل المحول الثاني

kV_b (المحرك في دائرة) $= 200 \times \dfrac{11}{220} = 10kV$

وهذه القيم موضحة على مخطط المنظومة داخل شكل بيضاوي أعلى كل جزء من شكل .



شكل (٤- ٨- ب) البيانات المعدلة لمنظومة القوى

وبالنظر إلى الشكل ومقارنة القيم الإسنادية بمقننات أجزاء المنظومة نجد اختلافا مما يستوجب تعديل قيم معاوقات عناصر المنظومة طبقا للقيم الإسنادية الجديدة.

معاوقة المولد:

$$Z_{G\,new} = Z_{G\,old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = \text{j}\,0.25 \times \frac{100}{120} \times (\frac{10}{10})^2$$

$$\therefore Z_G = \text{j}\,0.2083\,\text{pu}$$

معاوقة المحول الأول:

للمحول جانبين لكل منهما جهده المقنن ويقع كل منهما في دائرة لها قيمة إسنادية للجهد تختلف عن الأخرى، فيجب مراعاة أننا إذا اعتبرنا kV_{old} هي الجهد المنخفض للمحول كان لزاما أن نعتبر القيمة الإسنادية ناحية الجهد المنخفض على أنها kV_{new} وإلا حدث خطأ كبير في الحساب، فلهذا المحول سنعمل ناحية الجهد المنخفض وللمحول الثاني سنعمل ناحية الجهد العالي للتوضيح فقط مع التأكيد على أن لنا مطلق الحرية في اختيار أي من جانبي المحول .

$$Z_{T1new} = Z_{T1old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 \quad = \text{j}\,0.1 \times \frac{100}{100} \times (\frac{11}{10})^2$$

$$\therefore Z_{T1} = \text{j}\,0.121\,\text{pu}$$

خط النقل:

حيث إن معاوقة خط النقل معطاة بالأوم سيلزم حساب القيمة الإسنادية للمعاوقة في دائرة خط النقل أولا

$$Z_{\text{b}} = \frac{(kV_{\text{b}})^2}{MVA_{\text{b}}} \quad = \frac{(200)^2}{100} = 400\ \ \Omega$$

وتكون معاوقة خط النقل مقدرة بالوحدة

$$Z_{TL\,pu} = \frac{Z_{TL\,\Omega}}{Z_b} = \frac{j96.8}{400} = j\,0.242\ \text{pu}$$

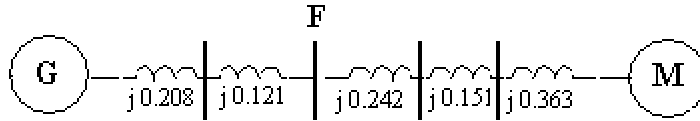
بالنسبة للمحول الثاني:

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 = j\,0.1 \times \frac{100}{80} \times (\frac{220}{200})^2 = j\,0.1513\ \text{pu}$$

معاوقة المحرك :

$$Z_{new} = Z_{old} \times \left(\frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}\right)\left(\frac{kV_{old}}{kV_{new}}\right)^2 = j\,0.18 \times \frac{100}{60} \times (\frac{11}{10})^2 = j\,0.363\ \text{pu}$$

والشكل التالي يوضح مخطط المعاوقة للمنظومة بعد تعديل قيم المعاوقات على أساس القيم الإسنادية الجديدة

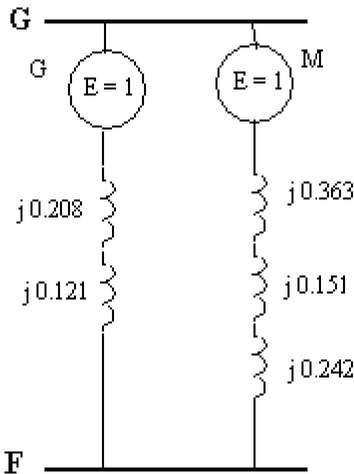


شكل (٤- ٨- ج) البيانات النهائية لمنظومة القوى

ورغم أن هذه المنظومة بسيطة ويمكن إيجاد تيار الخطأ بطريقة مباشرة بقسمة القوة الدافعة للمولد على المعاوقة بينه وبين نقطة الخطأ وكذلك بالنسبة للمحرك ولكن سوف نجري الخطوات المتبعة بصفة عامة سواء كانت المنظومة بسيطة أم لا لتوضيح هذه الخطوات.

ولحساب تيار القصر عند النقطة F:

قيمة الجهد المحددة لكل من المولد والمحرك هي 10kV ويجب تحويلها إلى قيمة بالوحدة لأن جميع الكميات الكهربية يجب أن تكون مقدرة بالوحدة



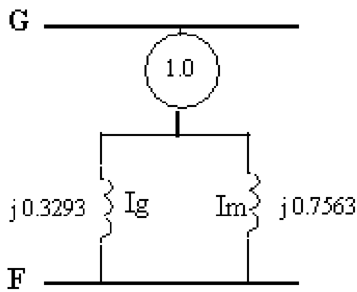
$$E_{G\,pu} = \frac{E_{G\,kv}}{kV_b} = \frac{10}{10} = 1pu, \qquad E_{M\,pu} = \frac{E_{M\,kv}}{kV_b} = \frac{10}{10} = 1pu$$

نرسم الدائرة المكافئة لمنظومة القوى في حالة حدوث الخطأ

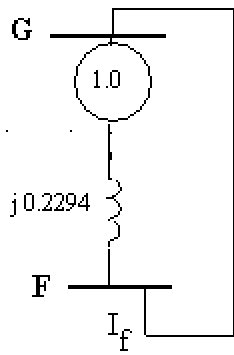
- كما هو موضح بالرسم المقابل، رسمنا خطا يمثل الأرض G وآخر يمثل نقطة الخطأ F
- مصادر تغذية الخطأ هي المولد والمحرك، ولذلك بدأنا بالمولد ورسمنا مسارات تغذية الخطأ منه (في هذه الحالة مسار واحد فقط الذي يضم المولد والمحول الأول) وفعلنا نفس الشيء للمحرك وله أيضا مسار واحد يشمل المحرك والمحول الثاني وخط

النقل

نبسط هذه الدائرة المكافئة و أولى خطوات التبسيط هو الاستعاضة عن جميع مصادر الجهد في الدائرة بمصدر وحيد كما هو موضح بالرسم المقابل، وكذلك نوجد المقاومة المكافئة لكل فرع من أفرع الدائرة، ونصل إلى معاوقتين على التوازي تكون المعاوقة المكافئة لهما:



$$Z_{eq} = \frac{j0.3293 \times j0.7563}{j0.3293 + j0.7563} = j0.2294\,pu$$



وبهذا نكون حصلنا على دائرة التتابع الموجب لمنظومة القوى لخطأ عند F في أبسط صورها أي مصدر جهد مع معاوقة على التوالي وقد اصطلح على تسمية المعاوقة المكافئة لدائرة التتابع الموجب X_1، وذلك لأن المقاومة مهملة وحيث إن الخطأ حصل عند F تكون المقاومة بينها وبين الأرض مساوية للصفر ولذلك نكمل الدائرة بتوصيل نقطة الخطأ بالأرض .

شكل(٤- ٩) الدائرة المكافئة لمنظومة القوى

حساب تيار القصر الكلي (I_f)

من دائرة التتابع الموجب التي حصلنا عليها يكون:

$$I_f = \frac{E}{X_1} = \frac{1.0}{0.2294} = 4.359 \text{ pu}$$

و لأن الخطأ حدث في دائرة خط النقل، فإن القيمة الحقيقية لتيار القصر تساوي حاصل ضرب قيمة تيار القصر بالوحدة و القيمة الإسنادية للتيار في دائرة خط النقل.

ولذلك نحسب القيمة الإسنادية للتيار في دائرة خط النقل

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200} = 288.675 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر

$$I_f = I_{f\,pu} \times I_b = 4.359 \times 288.675$$

$$I_f = 1258.33 \text{ A}$$

ولإيجاد تيار القصر في كل من المولد والمحرك نستخدم قانون تجزيء التيار بين معاوقتين على التوازي.

تيار المولد:

$$I_g = 4.359 \frac{j0.7563}{j0.7563 + j0.3293} = 3.037 \text{ pu}$$

القيمة الإسنادية للتيار في دائرة المولد

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10} = 5773.5 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر في المولد

$$I_g = I_{g\,pu} \times I_b = 3.037 \times 5773.5$$
$$I_g = 17534 \text{ A}$$

تيار المحرك:

$$I_m = 4.359 \frac{j\,0.3293}{j\,0.7563 + j\,0.3293} = 1.322 \text{ pu}$$

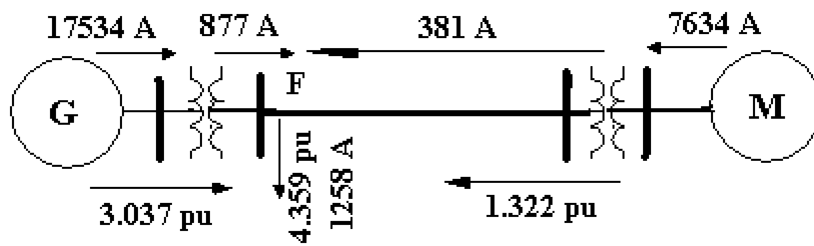
القيمة الإسنادية للتيار في دائرة المحرك

$$I_b = \frac{MVA_b \times 10^3}{\sqrt{3}.kV_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10} = 5773.5 \text{ A}$$

القيمة الحقيقية لتيار القصر في المحرك

$$I_m = I_{m\,pu} \times I_b = 1.322 \times 5773.5$$
$$I_m = 7634 \text{ A}$$

والشكل التالي يبين مخطط المنظومة موقعا عليه توزيع تيارات القصر في أجزاء المنظومة وقيم التيارات مقدرة بكل من الوحدة والأمبير



شكل (٤- ١٠) تيارات القصر في أجزاء منظومة القوى

٤- ٧ : حساب مقنن القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه

يتم حساب مقننات القصر لتحديد سعات القطع المطلوبة للقواطع التي ستقوم بحماية منظومة القوى ضد أخطار القصر، ولأن تيار القصر يكون أكبر ما يمكن في حالة الخطأ المتماثل ثلاثي الأوجه فإنه يتم حساب سعة القصر على أساس تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه. ولأن القواطع تكون متصلة على القضبان العمومية للمحطات التي تحتوي هذه القواطع فإن سعة القاطع تحسب على أساس

مقنن القصر لخطأ ثلاثي الأوجه على القضبان العمومية المتصل عليها القاطع. ويتم حساب مقنن القصر من المعادلة الآتية:

$$MVA_{sc} = \sqrt{3}.kV_r \times I_{sc} \times 10^{-3}$$

حيث : kV_r هو الجهد المقنن للقضبان العمومية المتصل عليها القاطع مقدرا بالكيلو فولت .

I_{sc} هو تيار القصر لخطأ متماثل ثلاثي الأوجه على نفس القضبان العمومية مقدرا بالأمبير .

MVA_{sc} هي مقنن القصر عند القضبان .



شكل (٤- ١١) منظومة القوى مع تحديد القواطع

ففي الشكل (٤- ١١) يمثل نفس النظام الموجود في شكل (٤- ١٠) مع تحديد القواطع ، ولحساب مقنن القصر للقواطع 2 , 1 نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية A وكذلك للقواطع 4 , 3 نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية B وللقواطع 6 , 5 نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية C وللقواطع 8 , 7 نحسب تيار القصر لخطأ متماثل عند القضبان العمومية D.

مثال (٤- ٤)

احسب مقنن القصر للقواطع 3,4 في شكل (٤- ١١). استخدم نتائج حسابات تيار القصر في المثال السابق.

الحل:

بمقارنة بسيطة للشكلين (٤- ١١) ، (٤- ١٠) نستنتج أن نقطة F في شكل (٤- ١٠) يمكن اعتبارها هي نفسها القضبان العمومية B وذلك لأننا فرضنا أن الخطأ وقع في بداية خط النقل من ناحية المولد وبداية خط النقل هي نفسها القضبان العمومية المتصل بها خط النقل ألا وهي B أي أن قيمة تيار القصر عند القضبان B هي نفسها قيمة تيار القصر عند النقطة F في المثال السابق.

ويكون لدينا:

$I_{sc} = 1258$ A

يساوي الجهد المقنن للمحول المتصل بهذه القضبان ($kV_r = 220$ kV)

وتكون سعة القصر:

$$MVA_{sc} = \sqrt{3}.kV_r \times I_{sc} \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 220 \times 1258 \times 10^{-3}$$

$$\therefore MVA_{sc} = 479.36 \text{ MVA}$$

وبالطبع لن تجد قاطعاً له سعة قطع تساوي القيمة المحسوبة بالضبط وذلك لأنه يتم تصنيع هذه القواطع بسعات قياسية وقد يكون أقرب سعة قياسية لمقنن القصر الذي تم حسابه هو 500MVA ولذلك عند اختيار سعة القاطع نأخذ هذه القيمة القياسية وليست المحسوبة.

٤- ٨ : تأثير القصر وزمن الفصل على الشبكة:

لكي نتصور مدى تأثير تيار القصر على الشبكة هناك عدة نقاط بسيطة يجب أن نستحضرها:

١. تيار القصر أكبر من تيار التشغيل العادي والذي تم تصميم و تركيب عناصر الشبكة على تحمله بعشرات المرات

٢. الطاقة الحرارية الناتجة عن التيار الكهربي تتناسب مع حاصل ضرب مربع القيمة الفعالة لشدة التيار والزمن

٣. القوة الكهرومغناطيسية الناتجة بين موصلات تحمل تيار تتناسب مع حاصل ضرب قيم التيارات في الموصلات.

ومن هذه النقاط الثلاثة يمكن تحديد تأثير تيار القصر في الآتي:

- التسخين الزائد لعناصر منظومات القوى التي يمر بها تيار القصر كالمحولات والمولدات والكابلات والخطوط والذي يصل إلى مئات المرات مقدار التسخين الناتج في حالات التشغيل العادي والذي يؤدي حتما إلى تدمير عوازل الكابلات والمحولات والمولدات وإلى انصهار الموصلات نفسها إذا استمر القصر لزمن طويل.
- القوى الكهرومغناطيسية بين الموصلات تكون أضعافا كثيرة للقيمة التي تم تصميم هذه الموصلات لتحملها وخصوصا القضبان العمومية وأدوات تثبيتها تكون أكبر تأثرا بهذه القوى.

بالإضافة إلى هذه التأثيرات يحدث شيء آخر ويكون خطيرا جدا إذا تأخر زمن الفصل، فمن المعلوم أنه أثناء القصر تنخفض الجهود في الشبكة بدرجة كبيرة مما يؤدي إلى أن تكون القدرة الكهربية المنقولة عبر الشبكة أقل بكثير من القدرة الميكانيكية الداخلة للمولدات. في مثل هذه الحالة تبدأ سرعة المولد الواقع تحت تأثير القصر في التسارع نتيجة لأن القدرة الميكانيكية الداخلة له أكبر من الخارجة وشيئا فشيئا إن لم يتم فصل الخطأ قبل زمن يعرف بزمن الفصل الحرج يخرج المولد عن العمل بالتزامن مع المولدات الأخرى وتستمر سرعته في الزيادة بشكل كبير إلى أن يتم فصله بواسطة أجهزة الحماية ضد

زيادة السرعة. وبعد خروج المولد الأول من الخدمة وفي حالة استمرار القصر تتداعى المولدات الباقية واحدا تلو الآخر حتى يحدث إظلام كامل ويلزم استعادة الشبكة من جديد.

٤- ٩ : الممانعات الصناعية

كما شرحنا باختصار في الجزء السابق الآثار التدميرية للقصر إذا تأخر فصله، ورأينا أن هذه الآثار تحدث كنتيجة مباشرة لتيارات القصر الكبيرة جدا، وتكون تيارات القصر كبيرة نظرا لكون ممانعة الشبكة في حالة القصر تكون صغيرة، ولذلك يلزم أحيانا إضافة ممانعات صناعية للحد من تيارات القصر. وأشهر هذه الممانعات هي الممانعات التي تضاف بين نقطة التعادل للمولد والأرض وكذلك تلك التي تضاف إلى خطوط النقل إما بالتوازي أو بالتوالي.

٤- ٩- ١ : ممانعات المولد

تضاف الممانعات بين نقطة التعادل والمولد للحد من تيار القصر وخصوصا تيارات القصر الأرضية. وذلك لأنه في حالة المولد تكون ممانعة التتابع الصفري أصغر من ممانعة التتابع الموجب ولذلك فإنه إذا حدث خطأ أرضي على أطراف المولد يكون تيار القصر أكبر منه في حالة القصر المتماثل ولذلك تضاف الممانعة للحد من هذا التيار، وهذه الممانعة لا تؤثر بحال في مقدار تيار القصر للخطأ المتماثل وإنما تقلل تيارات القصر للأخطاء المتصلة بالأرض. وهذه الممانعة قد تكون مفاعلة حثية أو مقاومة.

٤- ٩- ٢ : ممانعات المغذيات

تضاف الممانعات للمغذيات بعدة طرق ولأسباب مختلفة. فتضاف مفاعلات سعوية على التوازي لتحسين الجهد وتعويض القدرة غير الفعالة، وقد تضاف نفس المفاعلات السعوية على التوالي لتعويض ممانعة المغذي وتحسين أدائه ولزيادة قدرة الشبكة على نقل القدرة (زيادة حدود الاستقرار لمنظومة القوي).
وقد تضاف مقاومات أو مفاعلات حثية للتأريض بهدف الحد من تيار القصر.وكذلك يمكن استخدام تجميعات من المكثفات والملفات بغرض تعويض الحمل load compensation والهدف منه جعل الأحمال على الأوجه الثلاثة متزنة ، أو ملف مع مكثف مع نظام للتحكم في سريان القدرة عبر الخطوط والمغذيات في الشبكة .
فيما يعرف بأنظمة النقل المرنة للتيار المتغير.Flexible AC Transmission SystemsFACTS

شبكات النقل الكهربائية

دراسة بعض الظواهر التي تحدث على خطوط النقل

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذه الوحدة تكون:

ملما بتفسير وتعريف بعض الظواهر التي تحدث على خطوط النقل الكهربائي

مستوى الأداء المطلوب:

الوقت المتوقع للتدريب: ٣ ساعات

الوسائل المساعدة:

استخدم التعليمات في هذه الوحدة .

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

دراسة بعض الظواهر على خطوط النقل

٥- ١ : مقدمة

تكون خطوط النقل عرضة للعديد من الظواهر الداخلية والخارجية تؤثر على العمل الطبيعي لهذه الخطوط. ونذكر منها :

- الظاهرة السطحية (skin effect)
- ظاهرة التفريغ الهالي (Corona)
- الصواعق (lightning strokes)

فالظاهرة السطحية وظاهرة التفريغ الهالي يسببان فقدا في الطاقة المنقولة عبر الخط وتؤثران سلبا على جودة الموجة الكهربائية. أما الصواعق فإنها تسبب ارتفاعا شديدا في جهد الخط قد يؤدي إلى انهيار العوازل.

إن ضمان استمرارية الخدمة لمصادر الطاقة الكهربائية وموثوقيتها وكذلك جودتها يتطلب توجيه عناية خاصة لحماية الخطوط الكهربائية من هذه الظواهر.

٥- ٢ : الظاهرة السطحية (skin effect)

تعرف المقاومة الكهربائية لموصل ما بأنها ذلك الشيء الذي يعوق سريان التيار الكهربائي في الموصل ، وعلى الرغم من أن المقاومة النوعية لمادة الموصل تظل ثابتة في حالة كل من التيار المتردد والمستمر إلا أن المقاومة الكلية لأي موصل تكون أكبر في حالة التيار المتردد منها في حالة التيار المستمر. ويرجع السبب في ذلك إلى أنه في حالة التيار المتردد يظهر مجال مغناطيسي متردد يعمل على توليد قوة دافعة كهربائية مضادة في هذا المجال حيث تكون قيمتها عند مركز الموصل أكبر منها عند محيط الموصل الخارجي. وينتج عن ذلك وجود تيار معاكس للتيار الأصلي في الموصل عند المركز بينما يساعد مرور التيار عند السطح الخارجي . وبالتالي فإن التيار المتردد النهائي يسري في الموصل بالقرب من السطح الخارجي له مما ينتج عنه تقليل مساحة المقطع الفعلية فتزداد قيمة المقاومة الكلية للموصل وهذا هو ما يعرف باسم الظاهرة السطحية (أو الجلدية) للموصلات عند استخدامها في دوائر التيار المتردد.

وتتوقف النسبة بين مقاومة الموصل في حالة التيار المتردد ومقاومته في حالة التيار المستمر على شكل مساحة مقطع الموصل وخواصه المغناطيسية والكهربائية إضافة إلى التردد . وعلى ذلك في حالة الموصلات

الأسطوانية الشكل تأخذ في الاعتبار قيمة النفاذية المغناطيسية والمقاومة النوعية للموصل ، ويمكن حساب نسبة التغيير نتيجة الظاهرة السطحية في الموصلات من العلاقة :

$$m_r = \sqrt{\frac{8\,\pi^2 * 10^{-7} * f * \mu_r * r}{\rho}} \qquad (5.1)$$

حيث : μr : النفاذية المغناطيسية لمادة الموصل مقدرة بوحدات (H/m)

ρ : المقاومة النوعية لمادة الموصل مقدرة بوحدات (Ω.m)

f : تردد التيار المار في الموصل مقدرا بوحدات (Hz)

r : نصف قطر مقطع الموصل مقدرا بوحدات (m)

m_r : النسبة بين المقاومة في حالة التيار المتردد وحالة التيار المستمر

٥- ٢- ١ : الظاهرة السطحية لأسلاك وكابلات الصلب

لا يمكن حساب الظاهرة السطحية في أسلاك وكابلات الصلب بصورة دقيقة وذلك نظرا لتغير قيمة النفاذية المغناطيسية في مدى كبير خلال كل دورة من دورات التيار المتردد لذلك يفضل استخدام منحنيات الخواص المقاسة لهذه الأنواع.

٥- ٢- ٢ : الظاهرة السطحية للموصلات المفرغة

تصنع الكابلات كبيرة الحجم عادة من موصلات دائرية مفرغة . ويمكن حساب المقاومة الفعالة لهذه الموصلات باستخدام جداول خاصة، كما تستخدم صيغة رياضية خاصة لتعيين قيمة المقاومة الفعالة وتأثير الظاهرة السطحية لقضبان التوزيع المفرغة أو ذات المقطع المربع حيث تكون مقاومة هذا النوع أكبر من مقاومة النوع ذات المقطع المستدير.

٥- ٣ : ظاهرة التفريغ الهالي (corona)

تستخدم العوازل الغازية بصورة كبيرة في المعدات الكهربائية وأهم هذه الغازات المستعملة هي الهواء وغاز سادس فلوريد الكبريت وبنسبة أقل النيتروجين والفريون وثاني أوكسيد الكربون. وتحدث مختلف الظواهر داخل العوازل الغازية عندما يطبق عبرها جهد كهربائي حيث يسري تيار صغير جدا بين الأقطاب الكهربائية المعزولة بالغاز ، ويستعيد الغاز العازل خصائصه الكهربائية عند فصل المصدر. على الجانب الآخر إذا كان الجهد كبيرا تزداد شدة المجال الكهربائي Electric Field Intensity حيث

(E = V/D kV/cm) ويحدث التأين ومن ثم يزداد التيار الساري بين الأقطاب زيادة كبيرة ويحدث الانهيار الكهربائي وعندئذ تحدث شرارة موصلة قوية بين الأقطاب ويسمى أقصى جهد يفقد بعده العازل خاصية العزل بجهد الانهيار للغاز العازل.

إذا كان المجال الكهربائي منتظما فالزيادة التدريجية للجهد على الثغرة تحدث انهيارا كهربائيا للثغرة على هيئة شرارة بدون أية تفريغات ابتدائية. وعلى الجانب الآخر إذا كان المجال غير منتظم فالزيادة في الجهد تسبب أولا تفريغات في الغاز تظهر عند النقاط التي يكون عندها أعلى قيم للمجال الكهربائي أي عند النقاط الحادة في الموصلات الكهربائية. هذه التفريغات تسمى التفريغ الهالي (corona) ويمكن ملاحظتها كوميض لامع مائل إلى الزرقة وهذه الظاهرة مصاحبة بصوت أزيز. وظاهرة التفريغ الهالي على خطوط النقل الكهربائي تؤدي إلى فقدان في القدرة الكهربائية وتؤدي لتلف العازل الكهربائي ويصاحب ظاهرة التفريغ الهالي أيضا تداخل في موجات الراديو. وتتأثر ظاهرة التفريغ الهالي بقوة بالعوامل التالية :

أ- حالة سطح الموصل

ب - حالة الغاز المحيط(نسبة الرطوبة، ودرجة الحرارة، ونوع الغاز، وضغط الغاز...... إلخ)

ج- شكل الموصلات الكهربائية.

المجال الكهربائي المطلوب لعمل ظاهرة التفريغ الهالي لجهد متردد مرئية في الهواء على سطح الموصل، ويسمى مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي، لموصلين متوازيين نصف قطر كل منهما r :

$$E_w = 30\ m.d \left[1 + \frac{0.301}{\sqrt{d.r}}\right] \qquad (5.2)$$

وفي حالة الاسطوانتين متحدتي المحور ونصف قطر الاسطوانة الداخلية r تصبح المعادلة :

$$E_C = 31\ m.d \left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{d.r}}\right] \qquad (5.3)$$

حيث إن :

E_w مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي لموصلين متوازيين مقدرا بوحدات (V/m)

E_w مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي لاسطوانتين متحدتي المركز مقدرا بوحدات (V/m)

r نصف قطر الموصل مقدرا بوحدات (m)

m هي معامل عدم انتظام سطح الموصل

d هو معامل التصحيح لكثافة الهواء النسبية ويعطى بالمعادلة التالية :

$$d = \frac{3.92\ P}{(273 + T)} \qquad (5.4)$$

حيث إن : P هو الضغط الجوي مقدرا بوحدات (torr)

T درجة الحرارة بالدرجة المئوية.

ويمكن التقليل من حدوث ظاهرة التفريغ الهالي بما يأتي :

١- تنعيم أسطح الموصلات الكهربائية المستخدمة.
٢- تجنب الأحرف الحادة للموصلات الكهربائية.
٣- التنظيف المستمر لأسطح الموصلات من الغبار والأتربة.
٤- زيادة قطر الموصل في حالة الجهود العالية والجهود الفائقة وذلك باستخدام عديدة الموصلات (bundle conductors).
٥- زيادة ضغط الغاز.
٦- تجنب وجود الرطوبة بالغاز.

٥- ٤ : ظاهرة الصواعق (lightning strokes)

تعتبر ظاهرة الصواعق الكهربائية تفريغ كبير للشحنات المتراكمة في السحب إلى سحابة مجاورة أو إلى الأرض. وفي هذه الحالة فإن المسافة بين الأقطاب الكهربائية ، وهي المسافة بين السحابة والأخرى أو المسافة بين السحابة والأرض ، تكون كبيرة جدا قد تصل إلى ١٠ كيلومترات أو ربما أكثر. إن آلية تكون الشحنات داخل السحب وتفريغها هي عملية معقدة جدا.

٥- ٤- ١ : تكون الشحنات الكهربائية في السحب

العوامل التي تشترك في تكوين الشحنات الكهربائية في السحب كثيرة وغير محددة، لكن أثناء العواصف الرعدية تنفصل الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة بالتيارات الهوائية العنيفة التي تؤدي إلى دفع البلورات الثلجية للأجزاء العليا للسحابة والأمطار إلى الجزء السفلي للسحابة. هذا الفصل للشحنات يعتمد على ارتفاع السحب والذي يتراوح بين 200 و 10000 متر مع احتمالية تركز الشحنات على مسافة تتراوح بين 300 و 2000 متر. حجم السحب التي تشترك في تفريغ الصواعق الكهربائية للأرض غير محددة لكن الشحنات الكهربائية داخل السحابة يمكن أن تصل إلى 100 كولوم. لذلك فالسحب في هذه الحالة يمكن أن يكون جهدها الكهربائي يتراوح بين 10^2 إلى 10^8 فولت، مع مجال كهربائي بين 100 فولت/متر داخل السحابة إلى 10000 فولت/متر عند نقطة التفريغ الابتدائية. وتصل قيمة الطاقة الكهربائية المصاحبة لعمليات التفريغ إلى حوالي 250 كيلوات ساعة. وتكون المنطقة العليا من السحابة دائما موجبة الشحنة بينما المنطقة السفلى وقاعدة السحابة تهيمن عليهما الشحنات السالبة ماعدا المنطقة الموضعية – بالقرب من القاعدة والرأس للسحابة – والتي تكون موجبة الشحنة. ويمكن أن تصل أقصى قيمة للجهد الكهربائي على الأرض الناتجة عن السحب المشحونة إلى 300 فولت/سم بينما هذه القيمة تكون حوالي 1 فولت/سم في الأجواء الصحوة.

٥- ٤- ٢ : العواصف الرعدية والبرق وآلية الصاعقة الرعدية

تتكون العواصف الرعدية عندما يتصاعد الهواء الرطب والدافئ بسرعة كبيرة إلى طبقات الهواء الباردة.

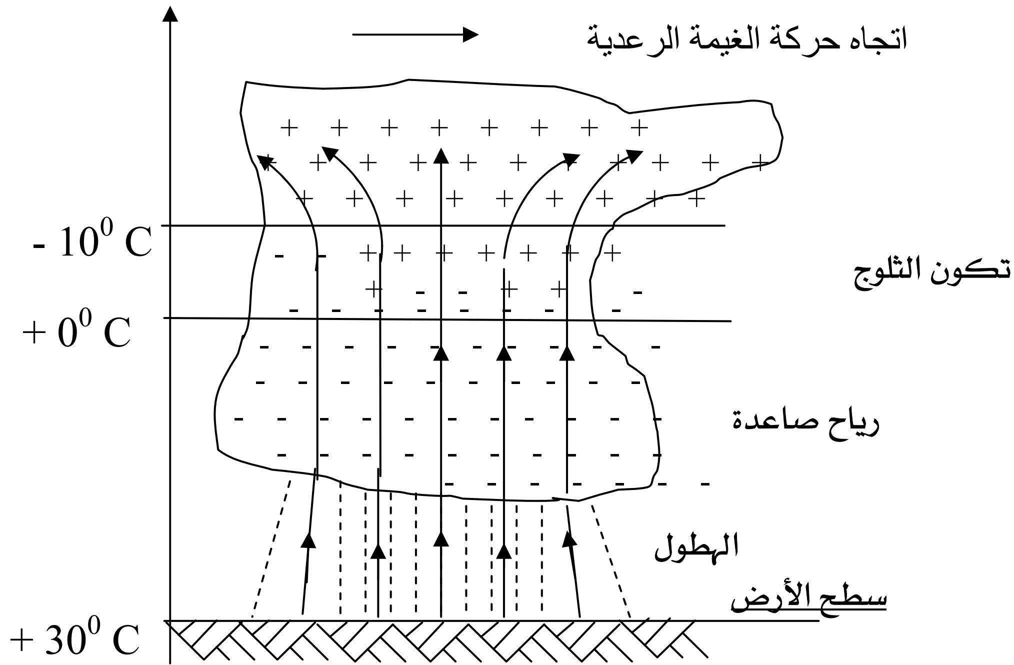
ويمكن لذلك أن ينتج عن قدوم جبهة هوائية باردة تندفع تحت الهواء الدافئ وترغمه على الصعود : جبهة رعدية أو رياح تدفع الهواء الدافئ والرطب على سفح جبل شديد الانحدار ، وترغمه على الصعود : عاصفة رعدية جبلية . أو إشعاع شمسي محلي يسخن الهواء الرطب على الأرض مما يؤدي إلى تمدده ويصبح بذلك أخف من الهواء المحيط فيرتفع : عاصفة رعدية حرارية محلية.

يبرد الهواء الرطب المتصاعد مع تزايد ارتفاعه. وتتكاثف الرطوبة فتتحول إلى سحب رعدية. فعندما يتم تخطي حد درجة الصفر في الريح الصاعدة يتكون ثلج يتساقط كحبيبات برد.

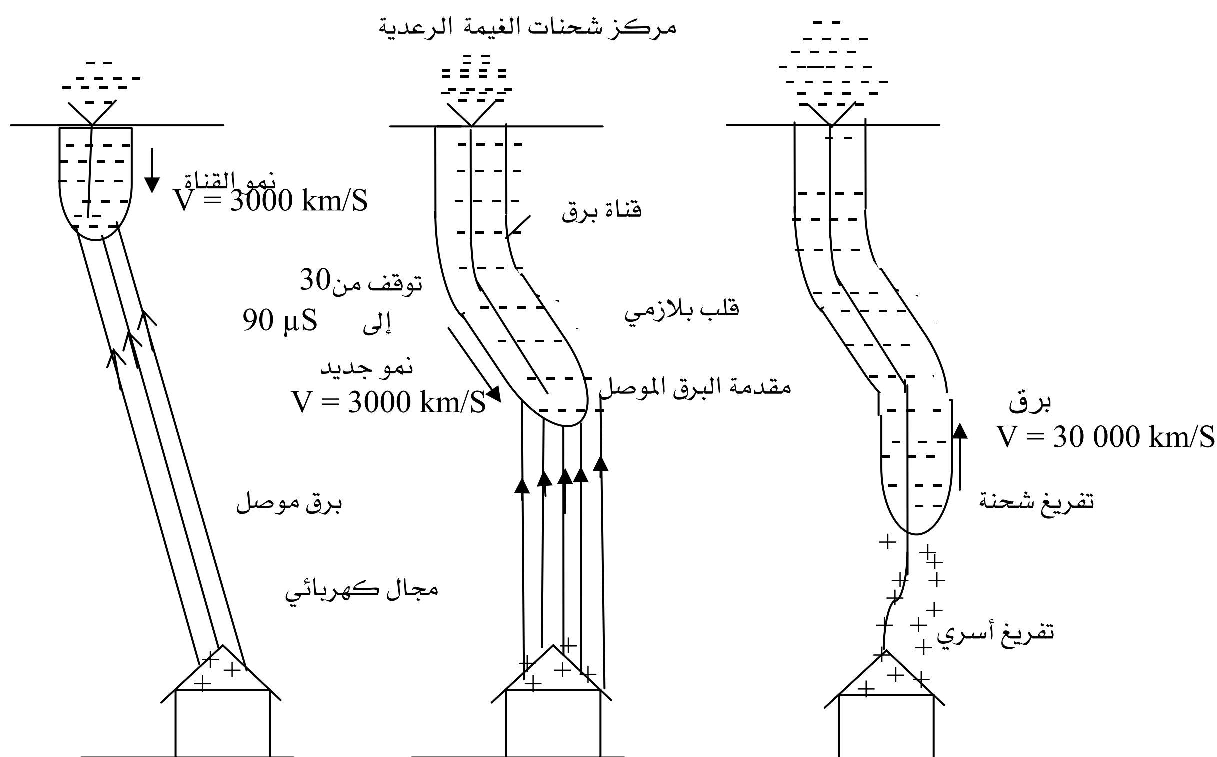
ويتم فصل الشحنات في السحب الرعدية بشكل رئيس من خلال تكون الثلج، وجزئيا من خلال احتكاك نقاط الماء في الريح الصاعدة، ويزداد نتيجة تأثير الهطول.و في تأثير الهطول تنقسم نقاط المطر الكبيرة فتسقط الأجزاء الثقيلة من النقاط مع الشحنة القطبية وترتفع الأجزاء الخفيفة ذات القطبية المعاكسة مع الرياح الصاعدة كما هو موضح في شكل (٥- ١)

إذا حصل فصل كبير في الشحنات ، تتكون ابتداء من مركز الشحنات قناة برق يمكن أن يبلغ نصف قطرها عدة أضعاف من 10 أمتار. وتنمو بشكل تدريجي في اتجاه الشحنة ذات القطبية المعاكسة شكل (٥- ٢) . وفي نفس الوقت ينمو في قناة البرق قلب من البلازما بتأين عال يسمى البرق الموصل، وتبلغ سرعته 3000 km/S ويكون مصحوبا بضوء خافت (ضوء جوي) . إذا التقى البرق الموصل مع الشحنة ذات القطبية المعاكسة – التي يمكن أن تنمو منها أيضا قنوات برق- يحصل ما يسمى التفريغ الأسري وتنهار الشحنات بسرعة تبلغ 30000 km/S ويصحب ذلك ضوء شديد يسمى البرق. ينتج البرق تيارا عاليا يصل أحيانا إلى 400 kA يولد مجالا مغناطيسيا شديدا يضغط الهواء الذي سخنه تيار البرق. ويمكن أن يصل الضغط في قناة البرق إلى 100 bar.

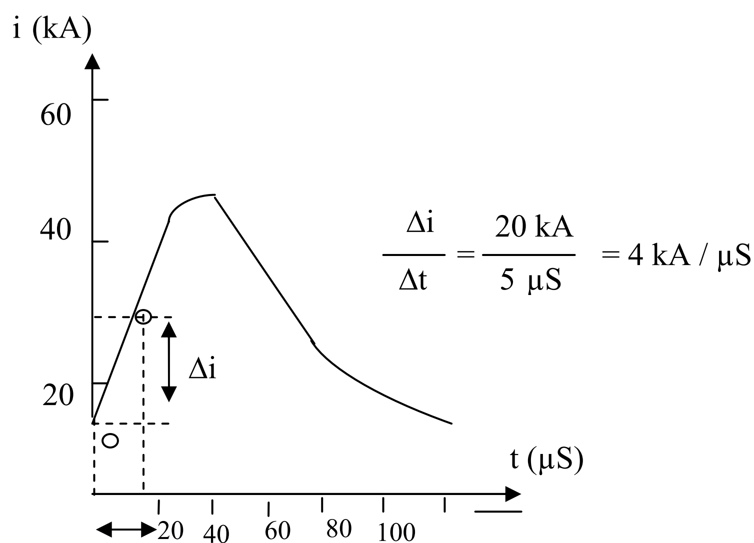
وبما أن عملية التفريغ تتم في زمن يتراوح بين 100 µs إلى 150 µs في المتوسط شكل (٥- ٣ أ ، ب)، فإن الهواء المضغوط في قناة البرق يتحرر بشكل مفاجئ، مما يؤدي إلى حدوث الرعد.



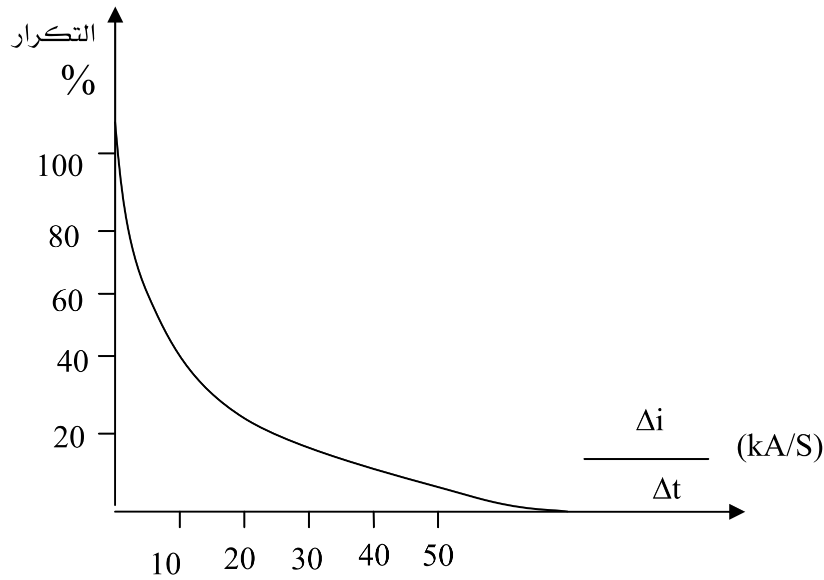
شكل (٥- ١) توزيع الشحنات في غيمة رعدية لعاصفة حرارية محلية



شكل (٥- ٢) : تمثيل مبسط لتكوين برق سالب بين السحابة والأرض



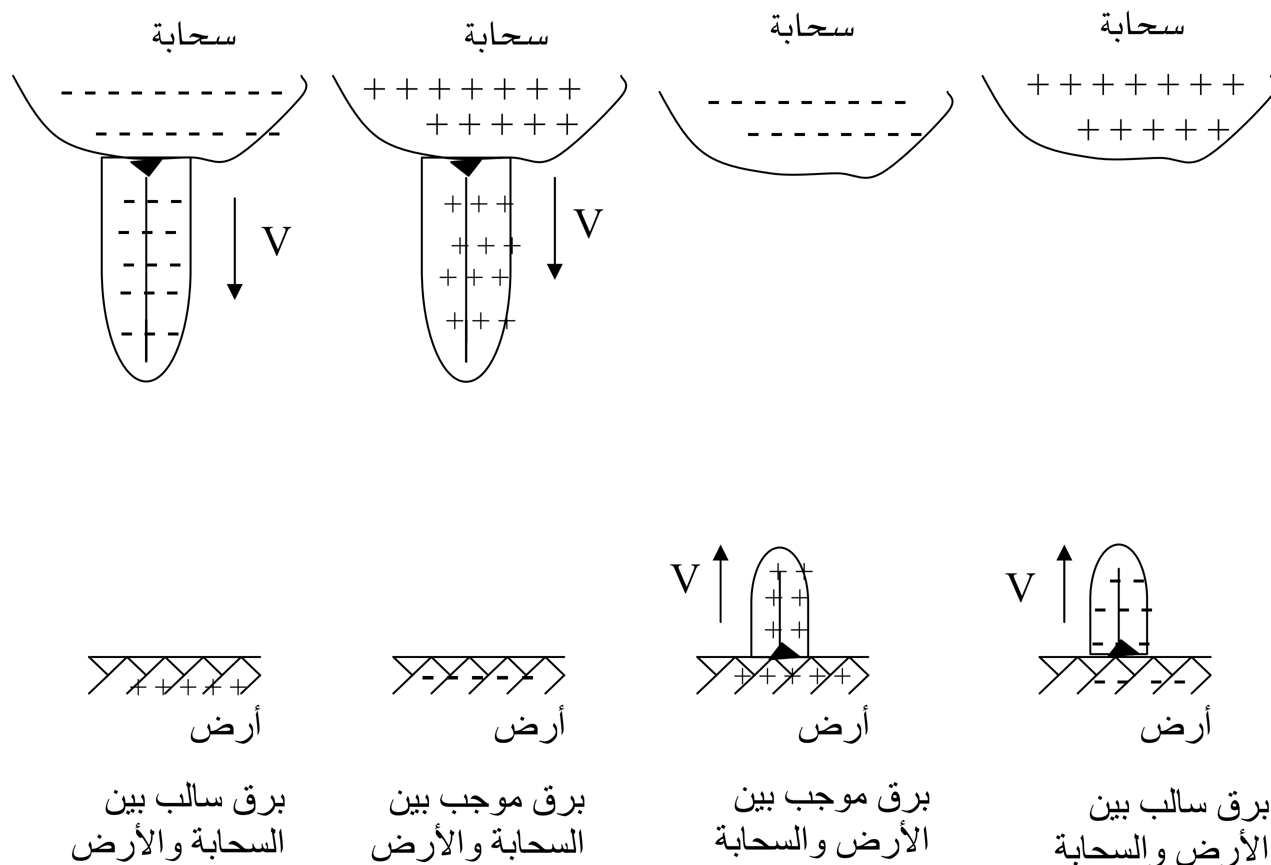
شكل (٥- ٣- أ) : منحني زمني لتيار البرق



$\frac{\Delta i}{\Delta t} = 7\ (kA/S)$ 50 % من البرق لها

شكل (٥- ٣- ب) : تكرار $\Delta i/\Delta t$

يمكن أن تتعاقب عدة تفريغات للشحنات عبر قناة البرق الواحدة ، ويمكن أن تنطلق قناة البرق ذات البرق الموصل من الشحنات الموجبة أو السالبة . كما يمكن أن يحدث تفريغ شحنات من سحابة إلى سحابة أو من سحابة إلى الأرض أو من الأرض إلى سحابة كما في شكل (٥- ٤) . ويحمل البرق الموجب في العادة طاقة أكبر .



شكل (٥- ٤) : أنواع البرق

٥- ٤- ٣ : تأثيرات البرق

يظهر التيار البرقي جميع التأثيرات التي يظهرها التيار الكهربائي.

أ - التأثير على الإنسان والحيوان

يكمن الخطر الأكبر في جهد التلامس وفي جهد الخطوة. فحتى على بعد ٣٠٠ متر من المكان الذي يضرب فيه البرق يمكن أن تظهر جهود خطوة خطيرة . والحيوانات معرضة للخطر على وجه الخصوص بسبب جهد الخطوة الأكبر . 40% من الإصابات بالبرق هي مميتة ويقع 70% من جميع الحوادث في الخلاء.

ب - التأثير الحراري

ترتفع درجة الحرارة في المواد الموصلة عند مرور تيار البرق فيها. ويمكن أثناء ذلك أن تسخن الموصلات الرفيعة بشكل كبير جدا بحيث يحترق العزل أو تشتعل المواد المجاورة القابلة للاشتعال. الطاقة الحرارية المنطلقة عند مواضع دخول البرق وخروجه في الأجزاء الموصلة يمكن أن تذيب بضعة

مليمترات مكعبة من المعدن. هذا يعني أنه يوجد خطر خاص في الأماكن المعرضة لخطر الانفجار. عندما يمر تيار البرق من خلال موصل رديء ورطب ، يتبخر السائل فيه بشكل مفاجئ ويؤدي إلى انفجار في الأعمدة الخشبية، أو الجدران ، أو الأشجار.

ج - التأثير الكهروديناميكي:

إذا تدفق تيار البرق في موصلات متوازية قريبة من بعضها (القضبان العمومية مثلا) فيمكن أن تظهر قوى كهروديناميكية بينها تصل إلى 400000 N/m يمكنها أن تحطم منشآت الموصلات الكهربائية بالكامل.

د - التأثير الكهروكيميائي :

يمكن أن يحلل تيار البرق بضعة ملي غرامات من المعدن على الأكثر.

٥- ٤- ٤ : قفز البرق :

إذا مر تيار برق مقداره 100 kA في تجهيزة وقاية من البرق بمقاومة أرضية تبلغ 5 Ω فسيكون جهد تجهيزة الوقاية بالنسبة للمنطقة المجاورة :

$$U = i \cdot R = 100 \times 10^3 \times 5 = 500\ kV \qquad (5.5)$$

وتقع جميع الأجزاء المعدنية المرتبطة بتجهيزة الوقاية من البرق تحت هذا الجهد العالي بالنسبة للأجزاء المعدنية الأخرى غير الموصولة بها والتي تقع على جهد الأرض مما يؤدي إلى قفز شرر إذا لم تكن المسافة بينهما كبيرة إلى الحد الكافي.

كما يمكن أن ينشأ جهد حث عال U_s على ملف مفتوح داخل تجهيزة الوقاية من البرق، والذي سببه هو جبهة تيار البرق ($\Delta i/\Delta t$) ذات الميل العالي جدا .

$$U_s = L\ \Delta i/\Delta t \text{ أو } U_s = M\ \Delta i/\Delta t \qquad (5.6)$$

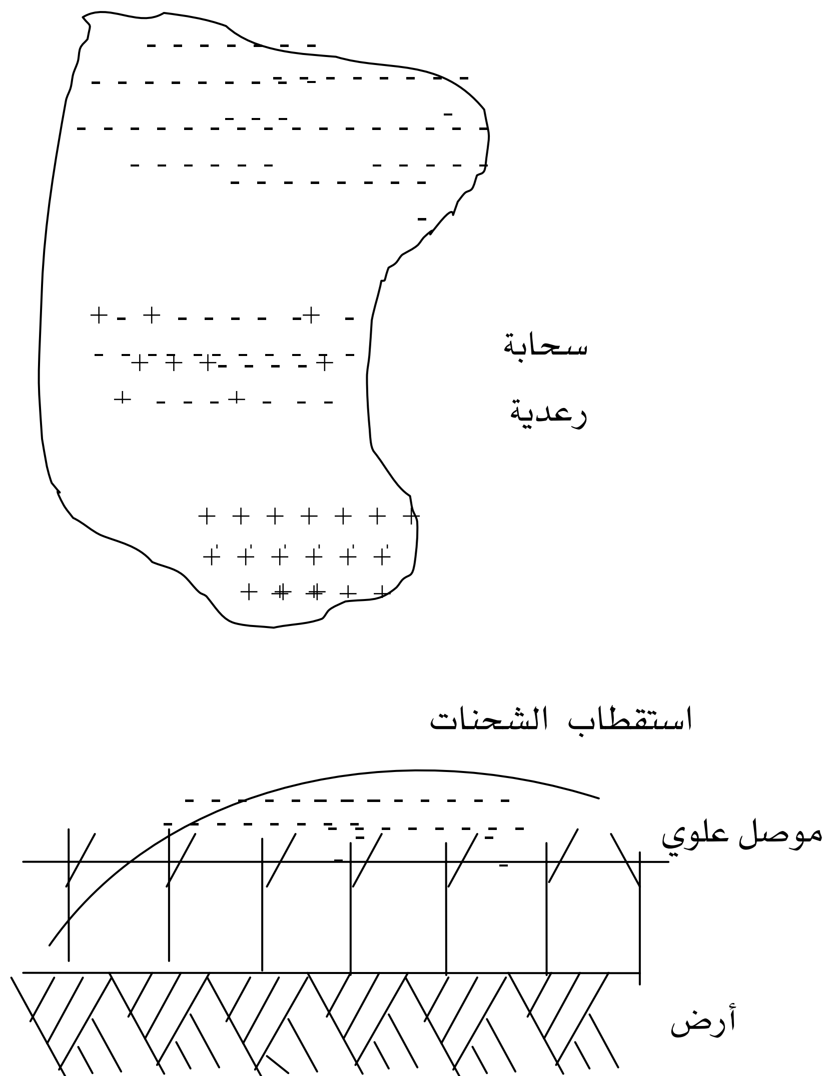
ويمكن أن يظهر شرر عرضي على هذه المواقع المفتوحة . هذا الشر ر العرضي يسمى قفز البرق.

٥- ٤- ٥ : الجهود الناتجة عن تشويشات جوية

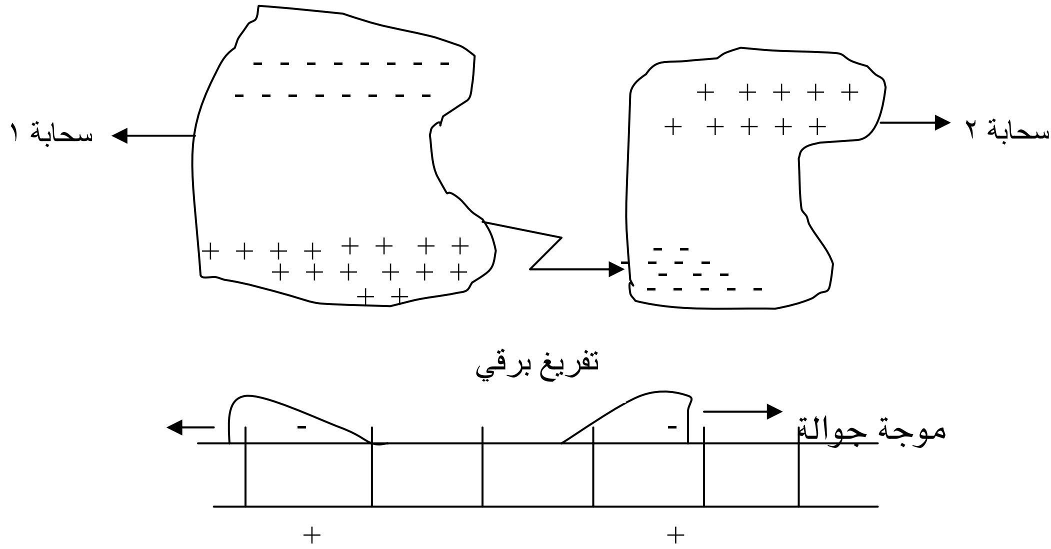
إذا اقتربت مثلا سحابة رعدية موجبة من موصل علوي شكل (٥- ٥) ، فتربط السحابة الموجبة شحنة سالبة على هذا الموصل (الشحن غير المباشر) ، في حين تتحرر الشحنات الموجبة نتيجة هذا الاستقطاب وتسري إلى الأرض عبر العزل والملفات. وعندما تفرغ هذه السحابة شحناتها عن طريق برق إلى

سحابة مجاورة كما في شكل (٥- ٦) ، تصبح الشحنات السالبة على الموصل حرة بشكل مفاجئ، ويتولد جهد بالنسبة إلى الأرض. فتنتشر هذه الشحنات كموجة جوالة إلى كلا الجانبين في نظام التوصيل. ومن خلال الحث والحث الذاتي نتيجة الجبهات الحادة $\Delta i/\Delta t$ للموجة الجوالة ينشأ خطر على عزل الموصلات والمحولات والآلات.

عند الصعق المباشر على الموصلات العلوية تتلف العوازل عند موقع الصعق وتسري الشحنات كأمواج جوالة في الموصلات وتعرضها للخطر كما في الشحن المباشر . كما تنتشر الموجة الجوالة في نظام الموصلات وجهد العزل



شكل (٥- ٥) : الشحنة على موصل علوي بسبب اقتراب سحابة رعدية



شكل (٥- ٦) : تفريغ الشحنات إلى السحابة المجاورة من خلال التفريغ البرقي.

٥- ٤- ٦ : حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق:

يتم حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق بالتصميم المناسب للخط ووضع خطوط حماية أرضية واستعمال مانعات الصواعق . ويمكن تجنب الزيادة الفجائية للجهود على الشبكة الكهربائية الناتجة عن الصواعق الكهربائية أو التقليل من أخطارها بالوسائل التالية :

(أ) حماية الخطوط الهوائية باستخدام خطوط أرضية على الأوجه لخطوط النقل

(ب) استخدام القضبان الأرضية

(ج) استخدام أجهزة الحماية مثل ثغرات التفريغ(expulsion gaps) وأنابيب الحماية على الخطوط ومانعات الصواعق عند نهايات الخطوط وكذلك بمحطات التحويل.

أ - الحماية باستخدام خطوط الحماية أو الخطوط الأرضية:

الخط الأرضي هو موصل كهربائي موجود على التوازي مع الموصلات الرئيسة لخط النقل الكهربائي الموضوعة على نفس البرج ومؤرض عند كل الأبراج المتساوية الأبعاد والمنتظمة .ويكون الخط الأرضي موجودا أعلى الخطوط الرئيسة لخط النقل الكهربائي. هذا الخط الأرضي يعمل على حماية خط النقل الكهربائي من الشحنات المتولدة من السحب وكذلك من تفريغ الصواعق الكهربائية.

ويمكن شرح كيفية حماية الخط الأرضي للخطوط الكهربائية كما يلي. بفرض أن السحابة الموجبة الشحنة موجودة أعلى الخط فإنها توجد شحنات كهربائية تأثيرية سالبة على الجزء من الخط الكهربائي والموجود أسفل منها. وبوجود الخط الأرضي مع الخط الكهربائي فإن كلا منهما سيكتسب شحنات تأثيرية ولكن الخط الأرضي يكون مؤرضا عند مسافات منتظمة لهذا فإن الشحنات التأثيرية المتولدة على الخط الأرضي تسرب إلى الأرض عند نقاط التأريض ويكون فرق الجهد بين الخط الأرضي والسحابة وبين الخط الأرضي والخط الكهربائي متناسبا عكسيا مع السعة (capacitances) بينهما ($V = Q/C$) ، وحيث إن الخط الأرضي أقرب للخط الكهربائي فإن الشحنات التأثيرية عليه تكون قليلة جدا ولذلك فإن الارتفاع في الجهد يكون بسيطا جدا.

ب - الحماية باستخدام قضبان التأريض وأسلاك الموازنة العكسية:

عند حماية الخطوط الكهربائية بالخط الأرضي فإن الصاعقة الكهربائية تضرب إما البرج أو الخط الأرضي . وفي هذه الحالة فإن مسار الشحنات إلى الأرض يكون من خلال البرج للأرض أو من خلال الخط الأرضي في الإتجاهات العكسية من نقطة الضرب . لذلك فإن الخط الأرضي يقلل من الجهد اللحظي لأعلى البرج حيث يكون مسار الصاعقة في ثلاث اتجاهات. الجهد اللحظي لأعلى البرج يكون :

$$V_T = I_0 Z_T/(1+Z_T/Z_S) \qquad (5.7)$$

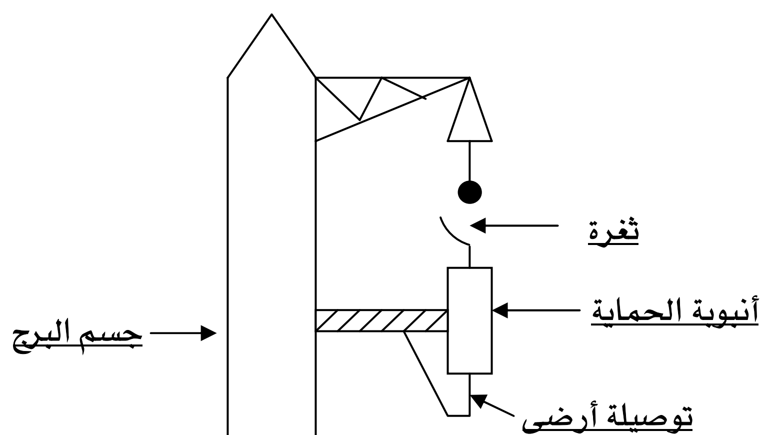
حيث Z_T هي معاوقة الدفعة للبرج (surge impedance) و Z_S هي معاوقة الدفعة للخط الأرضي. لو قللنا من قيمة معاوقة الدفعة للبرج والتي هي في نفس الوقت معاوقة تأريض البرج فإن جهد الدفعة سيقل في نفس الوقت.

القضبان الأرضية التي تستخدم يكون قطرها حولي ١٥ مم وطولها يتراوح بين ٢,٥ إلى ٣ متر . وفي الأرض الصلبة يزداد طول القضيب ويمكن أن يصل للعمق حوالي ٥٠ متر. وتصنع القضبان الأرضية عادة من الحديد المجلفن أو النحاس. ويعتمد عدد القضبان الأرضية والمسافات بينها على القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية . نفس التأثير السابق يمكن الحصول عليه باستخدام أسلاك الموازنة العكسية (counter poise wires) وتدفن هذه الأسلاك على عمق يتراوح بين 0.5 إلى 1 متر وموازيا لخطوط النقل الكهربائي وتوصل بأرجل والأبراج. طول هذه الأسلاك يتراوح بين 50 و 100 متر. وقد وجد أن هذه الأسلاك أكثر فعالية من القضبان الأرضية وتقلل قيمة معاوقة الصاعقة بفعالية والتي يمكن أن تصل إلى 25 أوم. ولا يؤثر عمق الدفن على مقاومة الأسلاك ولكن فقط يجب أن تدفن لعمق كاف لمنع

السرقة. ومن المطلوب استخدام أطوال أكبر أو عدد منها على التوازي بدلا من استخدام سلك واحد ولكن من الصعب أن نضع أكثر من سلك واحد موازنة بالمقارنة بالقضبان الأرضية.

ج - استخدام أجهزة الحماية:

في المناطق كثيفة حدوث الصواعق الكهربائية لابد من وجود أجهزة حماية من الصواعق الكهربائية على التوازي مع الخطوط الكهربائية. وعلى الخطوط الكهربائية نستخدم نوعين من الأجهزة تعرف بثغرات الانفجار وأنابيب الحماية شكل (٥- ٧). وغالبا ما يثبت بأطراف الخطوط الكهربائية ونقاط التوصيل الكهربائية على الخطوط ومحطات التوزيع الكهربائية مانعات صواعق.



شكل (٥- ٧) : تركيب أنبوبة الحماية

١ - ثغرات الانفجار:

ثغرات الانفجار هي أجهزة تحتوي على ثغرات الشرارة spark gaps مع أجهزة إطفاء الشرارة والتي تطفئ شرارة التيار عندما تنهار الثغرات خلال الزيادة الفجائية للجهد. فثغرة الانفجار تتكون من ثغرة قضيب هوائية بالتوالي مع ثغرة ثانية داخل أنبوبة فيبر. وفي حالة حدوث جهد فجائي تنهار كل من ثغرات الشرارة على التوالي. وتحد قيمة التيار الفجائي فقط بمقاومة تأريض الأبراج والمعاوقة الدفعية للأسلاك الأرضية. وتسبب الشرارة الداخلية في أنبوبة الفيبر خلال التيار الدفعي في تبخر جزء صغير من مادة الفيبر وتنتج بعض الغازات. هذه الغازات الناتجة تكون خليطا من بخار الماء ومنتجات تحلل مادة

الفيبر وتعمل على طرد نواتج الشرارة والهواء المتأين . وعندما يصل التيار المار ذو التردد للصفر تنطفئ الشرارة ويصبح المسار مفتوحا كهربائيا ويستعيد العازل شدته ويحتفظ مرة أخرى بحالته الطبيعية .

٢ - أنابيب الحماية:

أنابيب الحماية مماثلة لثغرة الانفجار في التركيب ومبادئ التشغيل وتتكون أيضا من قضيب أو ثغرة شرارة في الهواء مكونة من موصل الخط وطرف جهدها العالي وتثبت تحت الموصل على البرج. ويستبدل الفراغ الموجود بأنبوبة الانفجار بعنصر خطي (nonlinear element) والذي يوفر معاوقة عالية جدا عند التيارات المنخفضة وتقل المعاوقة بسرعة جدا عند التيارات العالية أو التيارات الدفعية. وعند حدوث الجهود الدفعية تنهار الثغرات الهوائية وتحد قيمة التيار بواسطة المقاومة ومقاومة الأرضي للأبراج. وتقل الجهود الدفعية على الخط حتى يتساوى مع الجهد الواقع على أنبوبة الحماية. وبعد تفريغ الجهد احلدفعي للأرض فإن التيار المتتابع ذا التردد سوف يحد بالمقاومة العالية وبعد قيمة الصفر الطبيعي لتيار الخط الكهربائي ذي التردد تستعيد ثغرة الشرارة وبسرعة قوة العزل. وعادة ما يكون جهد الانهيار السطحي (flashover voltage) لأنبوبة الحماية أقل من جهد الانهيار السطحي لعوازل الخط الكهربائي لذلك فهي قادرة على التفريغ الفعال للجهود الزائدة للصواعق الكهربائية.

٣ - مانعات الصواعق:

مانعات الصواعق هي أجهزة تستخدم في محطات المحولات الكهربائية وعند نهايات الخطوط الكهربائية وذلك لتفريغ الجهود الزائدة للصواعق الكهربائية والجهود الدفعية أثناء عمليات الفتح والغلق للقواطع الكهربائية. ومانعات الصواعق لها جهد انهيار سطحي أقل من أي عازل أو أجهزة بالمحطات الكهربائية ولها القدرة أيضا على تفريغ تيارات تتراوح بين 10 kA إلى 20 kA لجهود دفعية ذات فترات زمنية طويلة (20.8 µS) وتيارات تتراوح بين 100 kA إلى 250 kA لجهود دفعية ذات فترات زمنية قصيرة (1.5 µS)

تتكون مانعات الصواعق من مقاومات غير خطية على التوالي مع ثغرات شرارة والتي يمكن تمثيلها بمفاتيح سريعة العمل. وتتكون مانعة الصواعق من عدد من عناصر مقاومة غير خطية مصنوعة من كربيد السيلكون (silicon carbide) مصفوفة واحدة على الأخرى لجزأين أو ثلاثة يفصل بينها ثغرات شرارية. ويوضع التركيب الداخلي في محتوى من البرسولين. وتكتب خاصية العلاقة بين الجهد والتيار لعناصر المقاومة كالتالي :

$$I = kV^a \tag{5.8}$$

حيث إن I هو تيار التفريغ وV هو الجهد الواقع على العنصر و k و a هي ثوابت تعتمد على مادة وأبعاد العنصر . وعند وقوع الجهد الدفعي على مانعة الصواعق فإنها تنهار (انهيار الثغرات الهوائية).

التصميم البسيط لمانعات الصواعق يعمل على التيارات ذات الفترات الزمنية الصغيرة ويعمل على تيارات تتراوح بين 100 و 300 أمبير لتيارات ذات تردد القوى وحوالي 5000 أمبير للتيارات الدفعية. بينما مانعات الصواعق ذات التيارات العالية والفترات الزمنية الكبيرة والتي تعمل على التيارات الأعلى يزداد بها عدد العناصر المتوالية أو نستخدم طريقة أخرى للحد من التيارات في الطريقة المستعملة على نطاق واسع اليوم للحد من التيارات العالية جدا تصمم الثغرات بحيث يتم احتراق الشرارة في المجال المغناطيسي للملفات والتي تثار بواسطة تيار ذي تردد القوى. وأثناء تفريغ الصاعقة الكهربائية يتولد جهد عال في الملف بواسطة مقدمة الموجة الدفعية الطويلة وتحدث الشرارة في الثغرة المساعدة. وعند التيارات ذات تردد تنطفئ الشرارة في الثغرة المساعدة حيث يكون الجهد على الثغرة غير كاف لوجود الشرارة. وتحدث شرارة الثغرة الرئيسة في المجال المغناطيسي للملفات. ويتسبب المجال المغناطيسي وشكل البوق لإلكترودات الثغرة الرئيسة في إطالة الشرارة وعنصر المقاومة أثناء تفريغ الجهد الدفعي ويصبح مستوى الحماية ضد الصواعق الكهربائية أقل.

وفي بعض الأحيان يمكن الحد من تردد القوى والجهود الزائدة الأخرى بعد عدد معين من الموجات باستخدام مانعات الصواعق ويعتمد الجهد والزمن المسموح به على السعة الحرارية لمانعات الصواعق. ويختار الجهد المقنن للصواعق بحيث يكون أكبر من الجهد الزائد ذي تردد القوى المتوقع (الجهد بين الخط والأرض) عند نقطة التركيب تحت أية ظروف للأخطاء أو ظروف طبيعية.

٥- ٤- ٧ : مستوى العزل للمعدات الكهربائية وتنسيق العزل للمحطات الكهربائية

يمكن أن تتعدى جهود الموجات الدفعية ذات الزمن الأطول عند المحطات الكهربائية وعند مختلف النقاط على الخط الكهربائي مستوى الحماية لهذه المحطات وتعتمد هذه الموجات الدفعية على المسافة وموقع أجهزة الحماية من الصواعق. لذلك فمن الهام أن نحدد عدد المواقع المطلوبة لأجهزة الحماية التي تحقق أفضل تكلفة كلية اقتصادية. وغالبا في محطات محولات الجهد العالي تركب مانعات الصواعق بين المحول الكهربائي والقاطع الخاص به لحماية المحول من عملية تقطع التيار (current chopping) والتي تسبب في الجهود الزائدة والأكثر من ذلك فإن قرب مانعات الصواعق من المحول الكهربائي يوفر حماية أفضل للمحول. وغالبا ما يتحدد مستوى العزل الأساسي (basic insulation level) بإعطاء سماحية تقدر بحوالي 30% لمستوى الحماية لمانعات الصواعق واختيار مستوى الحماية الأساسية القياسي الأقرب التالي.

مستوى الحماية لعوازل محطات المحولات يعتمد على موقع المحطة ومستوى الحماية لمانعات الصواعق وخط التحجيب (line shielding) المستعمل. فالعوازل الكهربائية في نهاية الخط الكهربائي والقريبة من المحطات الفرعية عادة ما توضع لتقلل من الجهود الدفعية للصواعق التي تصل للمحطات الفرعية. أما في داخل المحطات فإن مستوى العزل لقضبان التوزيع يكون عاليا جدا وذلك لضمان استمرارية تدفق القدرة الكهربائية. وتعطى القواطع والمفاتيح الكهربائية وأجهزة القياس ومحولات التيار والجهد ....وهكذا مستوى الحماية الأقل التالي. وبما أن محول القوى هو الأكثر تكلفة والجهاز الحساس فإن مستوى العزل له هو الأقل.

المثال التالي لمحطة محولات جهد 132 kV يوضح مبادئ تنسيق العزل.

- جهد النظام الاسمي : 132 kV
- أعلى جهد للنظام : 145 kV
- أعلى جهد للوجه : $145x\ (\sqrt{2}\sqrt{3})=119\ kV_{peak}$
- الجهد الدفعي للفتح المتوقع : $3x119 = 357\ kV_{peak}$

(أ) مانعات الصواعق:

- الجهد المقنن : 123 kV
- مقدمة جهد الانهيار : $510\ kV_{peak}$
- جهد التفريغ عند 10 kA وموجة جهد دفعي 8/20 µS : $443\ kV_{peak}$

(ب) المحولات:

- الجهد الدفعي الذي تتحمله المحولات : $550\ kV_{peak}$
- مستوى الجهد التأثيري الذي تتحمله المحولات: $550\ kV_{rms}$
- سماحية الحماية من الجهد الدفعي للصواعق: 24% = 100x[443/(443 - 550)]

(ج) أجهزة الحماية من الأخطاء switchgear

- الجهد الدفعي المحتمل : $650\ kV_{peak}$
- الجهد الدفعي للصاعقة الذي تتحمله عوازل قضبان التوزيع : $650\ kV_{peak}$

وعند استخدام قضبان ثغرات الشرارة لحماية المحولات من الجهود الدفعية ، يمكن اختيار قضبان ثغرات الشرارة ذات جهد انهيار سالب قدره 440 kV (ثغرة طولها 59سم) لتعطي سماحية قدرها 25% وتعطي حماية جيدة للجهود الدفعية التي يكون زمن مقدمتها أكبر من 2 ميكرو ثانية.

أسئلة وتمارين

(١) اشرح النظريات المختلفة لتكون الشحنات بالسحب.

(٢) اشرح ميكانيزم تطور الصاعقة الرعدية والجهود المتولدة على خطوط النقل الكهربائي.

(٣) اشرح الطرق المختلفة لحماية خطوط النقل الكهربائي من الصواعق الرعدية.

(٤) اشرح مبادئ ووظيفة كل من ثغرات الانفجار وأنابيب الحماية

(٥) اشرح وظيفة مانعات الصواعق كجهاز حماية.

(٦)اكتب نبذة مختصرة عن الآتي :

(أ) قضبان ثغرات الشرارة كجهاز حماية من الجهود الزائدة

(ب) الخطوط الأرضية لحماية خطوط النقل من الصواعق .

المراجع

- Electric Power Systems, Sayed A. Nassar and F. C. Trutt, Taylor and Fracis, 2001 .
- Electric Power Cable Engineering, 2nd Edition, William A. Thue, Taylor and Fracis, 2003 .
- Electric Power Systems, J. A. Harrison, McGraw Hill, 1996 .
- Power System Analysis, C. A. Gross, J. Wiley & Sons Ltd, 1997 .
- Elements of Power System Analysis, W. D. Stevenson, McGraw Hill International Edition

المحتويات